

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Analýza přesnosti laseru pro dělení materiálu

Analysis of the laser accuracy for material cutting

Student:

Bc. Aleš Daněček

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Pavlica

Ostrava 2015

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se úplně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. -autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola banská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední- knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/ 1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách) ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....
Bc. Aleš Daněček
Stachovice 110
742 45 Fulnek

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DANĚČEK, Aleš. Analýza přesnosti laseru pro dělení materiálu. Ostrava: katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2015, 47s. Diplomová práce, vedoucí Pavlica, Marek.

Diplomová práce se zabývá analýzou přesnosti laseru pro dělení materiálu. V úvodní teoretické části je proveden rozbor problematiky tepelného dělení materiálu. V další části je proveden návrh měření vybraných vzorků, které se skládaly z konstrukční oceli jakostí S235JRC, S355MC, korozivzdorné oceli X5CrNi18-10. Následně proběhlo samotné měření parametru drsnosti, úchylky kolmosti a rozměrové odchylky. Vzorky byly následně vyhodnoceny a zařazeny dle jednotlivých parametrů do tříd přesnosti dle normy ČSN EN ISO 9013.

ANNOTATION OF THESIS

DANECEK, Ales. Analysis of the laser accuracy for material cutting. Ostrava: Department of Machining and Assembly, Faculty of Engineering VSB-Technical University of Ostrava, 2015, 53p. Thesis, head Pavlica, Marek.

This thesis analyzes the precision of laser for cutting. In the introductory theoretical part analyzes the problems of thermal cutting. The other part is the design of a measurement of selected samples, which consisted of structural steel grades S235JRC, S355MC, stainless steel X5CrNi18-10. Was itself subsequently measuring a parameter of roughness and dimensional tolerances on perpendicularity deviation. The samples were evaluated and classified according to various parameters in accuracy classes according to DIN EN ISO 9013.

Obsah

Seznam použitého značení	6
1 Úvod do problematiky tepelného dělení materiálu	7
1.1 Druhy metod dělení	7
1.2 Dělení třískovými metodami	7
1.3 Dělení tvářecími metodami	8
1.4 Teplené dělení.....	8
1.4.1 Řezání autogenem	9
1.4.2 Plazmové řezání	10
1.4.3 Řezání paprskem elektronů	12
1.4.4 Řezání laserem	14
1.4.4.1 Rozdělení laseru.....	15
1.4.4.2 Metody řezání laserem	19
1.4.4.3 Řezné parametry	20
1.4.4.4 Vady řezu	21
1.4.4.5 Výhody a nevýhody laserového řezání [1]	22
2. Návrh metodiky měření přesnosti laseru	24
2.1 Jakost povrchu řezu	25
2.1.1 Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka	25
2.1.2 Drsnost	26
2.1.3 Rozměrové úchytky.....	27
2.2 Použitá zařízení a měřidla.....	27
2.2.1 Měření drsnosti.....	27
2.2.2 Měření úchylky kolmosti	29
2.2.3 Měření jmenovitých rozměrů	30
3 Zpracování výsledků měření přesnosti laseru	31
3.1 Výsledky měření vzorku z konstrukční oceli S235JRC	33
3.1.1 Výsledky parametru drsnosti Ra a Rz5	33
3.1.2 Výsledky parametru úchylky kolmosti u	34
3.2 Výsledky měření vzorku z konstrukční oceli S355MC.....	35
3.2.1 Výsledky parametru drsnosti Ra a Rz5	35
3.2.2 Výsledky parametru úchylky kolmosti u.	36

3.3	Výsledky měření vzorků materiálu DD11	36
3.3.1	Výsledky měření parametru drsnosti Ra a Rz5	36
3.3.2	Výsledky měření parametru úchylky kolmosti u.	37
3.4	Výsledky měření vzorku materiálu DC01	37
3.4.1	Výsledky měření parametru drsnosti Ra a Rz5	37
3.4.2	Výsledky měření parametru úchylky kolmosti u.	38
3.5	Výsledky měření vzorku korozivzdorné oceli X5CrNi18-10.....	38
3.5.1	Výsledky měření parametru drsnosti Ra a Rz5	38
3.5.2	Výsledky měření parametru úchylky kolmosti u.	39
4	Vyhodnocení vzorků a porovnání s ČSN EN ISO 9013	40
4.1	Zhodnocení vzorků konstrukční ocelí jakosti S235JRC.....	41
4.1.1	Vyhodnocení parametru Rz5.....	41
4.1.2	Vyhodnocení úchylky kolmosti	42
4.2	Zhodnocení vzorků konstrukční ocelí jakosti S355 MC	42
4.2.1	Vyhodnocení parametru Rz5.....	43
4.2.2	Vyhodnocení úchylky kolmosti	44
4.3	Zhodnocení vzorků jakosti DC01 a DD11	44
4.3.1	Vyhodnocení parametru Rz5.....	45
4.3.2	Vyhodnocení úchylky kolmosti	46
4.4	Zhodnocení vzorků z korozivzdorné oceli 1.4301	46
4.4.1	Vyhodnocení parametru Rz5.....	47
4.4.2	Vyhodnocení úchylky kolmosti	48
4.5	Zhodnocení rozměrových úchylek	48
4.5.1	Vzorek DC01 - tloušťka 2 mm.....	49
4.5.2	Vzorek X5CrNi18-10 – tloušťka 5 mm	50
4.5.3	Vzorek X5CrNi18-10 – tloušťka 10 mm	51
4.5.4	Vzorek S235JRC – tloušťka 20 mm.....	51
5	Závěr.....	52
6	Seznam použité literatury.....	53

Seznam použitého značení

Zkratka/symb

ol	Popis	Jednotka
a	Tloušťka řezaného materiálu	[mm]
IR	Infračervené záření	[-]
LASER	Light Amplification of Stimulated of Radiation (zesílení světla stimulovanou emisí záření)	[-]
LED	Luminescenční dioda	[-]
ln	Vyhodnocovaná délka při měření drsnosti	[mm]
lr	Základní délka při měření drsnosti	[mm]
n	skluz	[mm]
PN	PN přechod polovodiče	[-]
r	Poloměr zaoblení hrany	[mm]
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu drsnosti	[μm]
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu	[μm]
Rt	Největší hloubka drsnosti vyhodnocená v celém rozsahu délky	[μm]
Rz	Největší výška základního profilu	[μm]
Rz5	Průměrná výška profilu	[μm]
u	Úchylka kolmosti	[mm]
Zt	Výška profilu. Srovnatelné s Rt	[μm]

1 Úvod do problematiky tepelného dělení materiálu

1.1 Druhy metod dělení

Princip dělení materiálu spočívá v tom, že se část materiálu dělí na několik menších části potřebné délky a podle požadovaných rozměrů. Ve většině případu se touto operací začíná, v mnoha případech je i ale operací konečnou. Dělení materiálu rozlišujeme podle různých hledisek:

- Třískové metody (řezání, upichování, rozbrušování)
 - Tvářecí metody (vysekávání, stříhání, lámání)
 - Tepelné dělení (řezání autogenem, řezání plazmou, svazkem elektronů, laser)
- [6], [7]

1.2 Dělení třískovými metodami

Řezání rozlišujeme na ruční a strojní metody. Pro dělení tímto způsobem je charakteristický znak tříska, která ve formě úlomků, představuje odpad. Mezi nejpoužívanější metody dělení materiálů patří rozřezávání na rámových, kotoučových, nebo pásových pilách.

[6], [8]

Tab. č. 1: Parametry strojních pil

Charakteristika	RP	KP	PP
Požizovací cen	N	V	S
Instalovaný příkon	S	V	N
Produktivita dělení	N	S	V
Univerzálnost použití	N	S	V
Cena nástroje	N	S	V
Životnost nástroje	N	V	S
Přesnost přířezu	N	V	S
Ztráta materiálu řezáním	V	S	N
RP-rámové pily, PP-pásová pily, KP- kotoučové pily Hodnota parametru: N-nízká, S – střední, V - vysoká			

1.3 Dělení tvářecími metodami

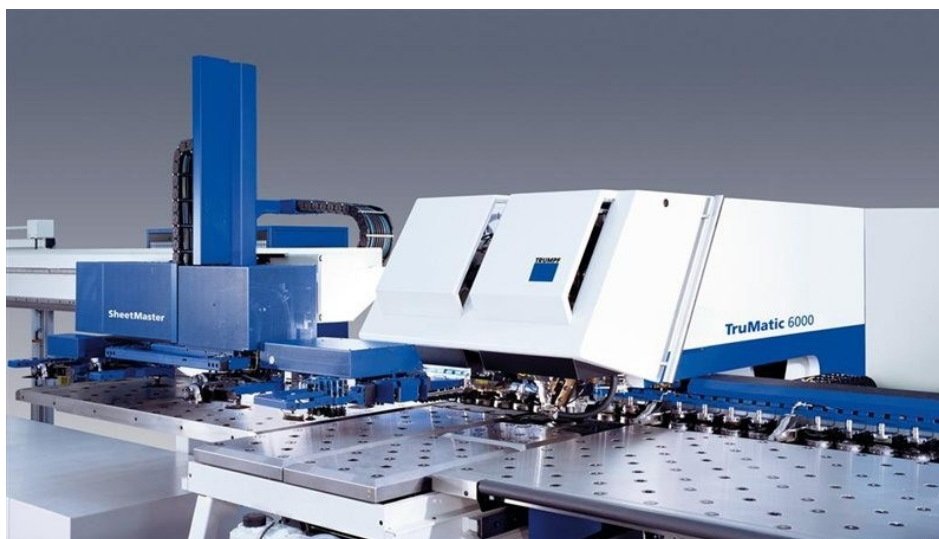
U tohoto dělení materiálu je nejpoužívanější způsob stříhání, která je jednou z nejrozšířenějších metod pro dělení plechu. Mezi dalšími základními technologiemi jsou:

- Lámání
- Sekání a vysekávání
- Stříhání

Ručními nůžkami se stříhají tenké plechy do tloušťky 1 mm, do tloušťek 40 mm se plechy a pásy stříhají tabulovými nůžkami. Nůžkami rovněž můžeme dělit tyče do průměru 50 mm s maximálním průřezem až 2500 mm².

Dělení lámáním se provádí pouze za studena na lisech. Před samotným lámáním je vhodné v místě lomu vytvořit vrub o šířce 5 až 7 mm. Procesem lámáním dosahujeme vysoké produktivity, kde nám metoda umožňuje dělit na krátké kusy. Nevýhoda této metody je neschopnost dělit měkkí materiály, materiál by se pouze ohnul.

Další formou dělení materiálu je tzv. vysekávání, což znamená oddělování součástí podél uzavřené křivky vysekávací raznici proti tvarově shodné matici. Prosekávat lze až do tloušťky 8 mm. Tento způsob je beztržkový, pro různé materiály i velmi složité tvary výrobků a v průmyslu se často využívá. [9], [8]



Obr. č. 1: Vysekávací centrum Trumatic [5]

1.4 Teplé dělení

Tepelné dělení materiálu lze v rámci strojírenské výroby zařadit mezi operace přípravy materiálu. U všech metod tepleného dělení materiálu využívají soustředěné tepelné energie

působící v místě řezu. Celkově tepelné dělení materiálu můžeme použít na celou řadu konstrukčních materiálu: nízkolegované a nelegované oceli, neželezné kovy a jejich slitiny (hliník), nekovové materiály (dřevo, papír, sklo, plasty), vysoce reaktivní materiály a jejich slitiny citlivé na kyslík (titan). Mezi prvními materiály, které byly tepelně zpracovány (kyslíkem), byly nelegované materiály, s postupem času a vývojem této technologie přišla možnost tepelně dělit téměř kterýkoliv druh materiálu. [1], [11]

1.4.1 Řezání autogenem

Řezání plamenem, nebo také jinak řečeno Autogenem, patří do skupiny tavného dělení materiálu. Tato metoda je založena na principu spalování kovů v proudě čistého kyslíku při teplotách pod bodem tavení, aniž by došlo k roztavení kovu. [1], [11], [12]

Podmínky řezání:

- Teplota zápalu u základního materiálu musí být nižší než jeho teplota tavení
- Teplota tavení vznikajících oxidů musí být nižší než teplota tavení základního materiálu
- Oxidy musí být dostatečně tekuté
- Při řezání tloušťek nad 300 mm se vyžaduje ohřev v místě řezu na zápalnou teplotu v celé tloušťce materiálu

Zařízení pro řezání:

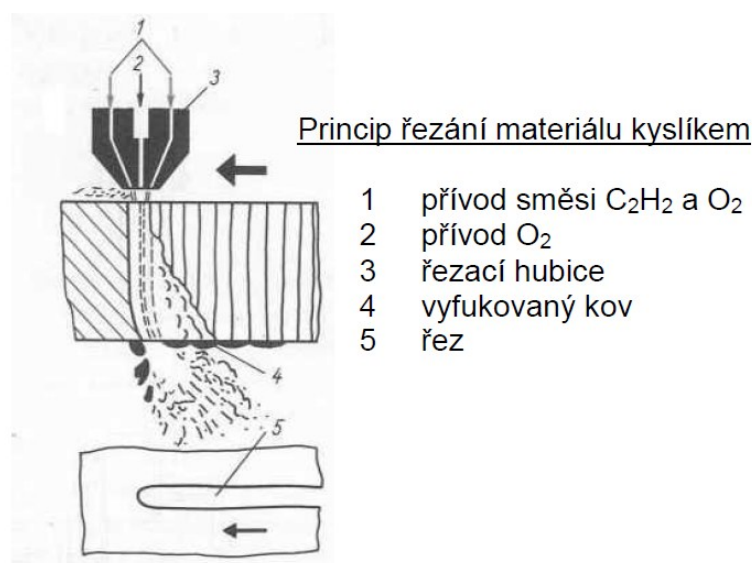
- Láhve se stlačenými plyny- acetylen, který můžeme nahradit vodíkem nebo propan-butanem a kyslík čistotě 99,2%.
- Řezací hořák- Funguje na principu tepelné a řezací trysky. Pomocí vodícího vozíku a při kruhových řezech se středovým zařízením dosahuje klidného řezu za stejnoměrné vzdálenosti trysek od řezaného materiálu.
- Redukční ventily
- Hadice k přívodu hořlavého plynu a kyslíku

Princip řezání kyslíkem spočívá v předehřevu řezaného materiálu na teplotu okolo 1100°C (pro ocel červené zbarvení) pomocí předehřívacím plamenem. Následně využíváme proudící kyslík otvorem řezací hubice, který spaluje předehřátý kov a tlakem vyfukuje pryč ze spáry.

Řezání plamenem má dlouhou historii a stále se využívá v opravárenství, instalátérství, topenářství a při různých autoopravách.

Mezi další metody řezání plamenem patří: drážkování kyslíkem, řezání pomocí prášku a kyslíku, řezání kyslíkem a elektrickým obloukem.

Tato metoda se řadí mezi ty levné a dobře využitelné na oceli. Materiál můžeme řezat v libovolné poloze i v těžko dostupných místech, musíme ale zajistit, aby místo řezu bylo vždy průchozí, aby kyslíkové proudy mohly volně vystupovat. Nevýhodou této metody je požadavek zručnosti obsluhy, velké drsnosti řezných hran, nekvalitní povrch, velká tepelně ovlivněná oblast a touto metodou můžeme řezat pouze oceli. [1], [11], [12]

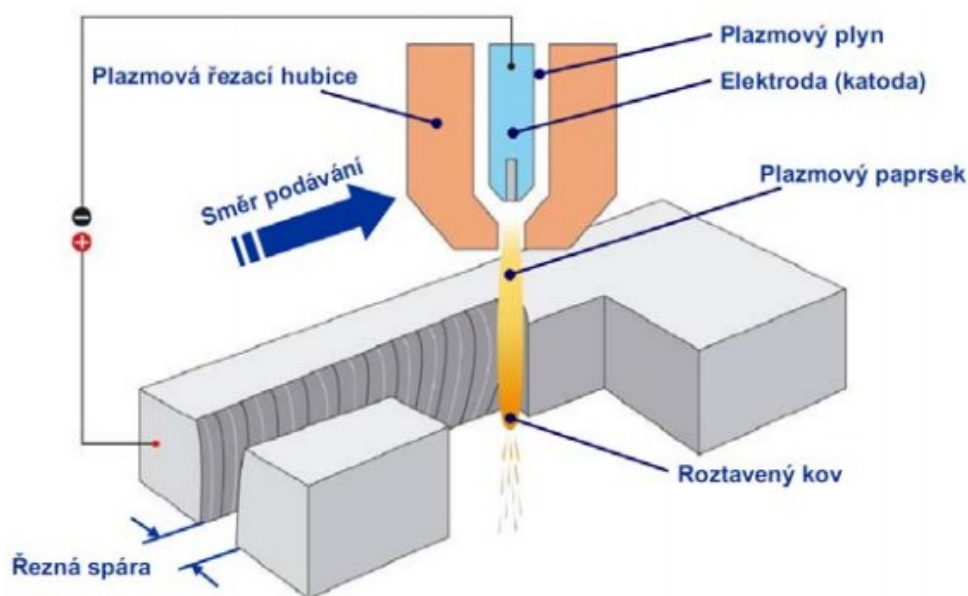


Obr. č. 2: Princip řezání materiálu kyslíkem

1.4.2 Plazmové řezání

U tohoto tepelného dělení je základem ohřev nebo tavení materiálu za vysokých teplot, které vznikají rozkladem molekul plynu při jejich průchodu elektrickým obloukem.

Pojem plazma je již známý od roku 1923 pro speciální stav plynů, někdy bývá plazma označována jako čtvrtý stav hmoty. Plazma je vysoce žhavý, elektrický vodivý plyn. Mezi používané plazmové plyny patří argon anebo dvouatomové plyny vodíku, kyslíku, dusíku a vzduchu. U této metody je maximální řezná tloušťka řezaného materiálu do 250 mm. [11], [13]



Obr. č. 3: Princip plazmového řezání [1]

Zařízení pro řezání plazmou:

- Plazmový hořák- zde dochází k přeměně elektrické energie na energii tepelnou usměrněného proudu plazmatu. V plazmovém hořáku je důležité, aby elektrický oblouk zůstal stabilní.
- Zdroj elektrického proudu
- Řídící jednotka
- Manipulační zařízení, pracovní stůl, robot

Používané plyny

- Plazmové plyny- tyto plyny jsou přiváděny přímo do oblouku a zde dochází k jejich ionizaci a disociaci.
- Fokusační plyny- Tyto plyny nám zaostřují vyslaný paprsek z trysky hořáku.
- Asistenční plyny- Tento plyn chrání obrobek před účinkem atmosféry, obklopuje paprsek plazmatu a pracovní místo

Správná volba asistenčního a plazmového plynu závisí na druhu zpracovaného materiálu a jeho tloušťce. Použitím obou plynů je doporučováno výrobcem zařízení.

Použití metody

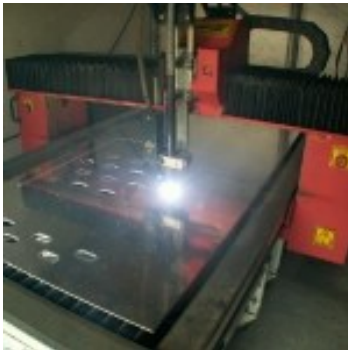
Plazmové řezání se používá pro svařování, navařování, řezání a stříkání vrstev materiálu předepsaných vlastností na strojní součásti, dále se využívají na obrobení těžkoobrobitelných materiálů.

Výhody:

- Ke snížení hluku a pro velmi malé tepelně ovlivněné oblasti řezaného materiálu se používá řezání plazmou pod vodou.
- V porovnání s řezáním autogenem je řezná rychlost až 10x vyšší
- Velký výkon při řezání do tloušťky 30 mm

Nevýhody:

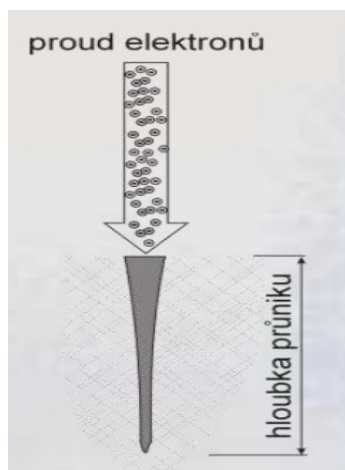
- Maximální tloušťka u suchého řezání do 200 mm u řezání pod vodou do 120 mm
- UV záření
- Široká řezná spára
- Zaoblení horní hrany
- Vysoká hlučnost



Obr. č. 4,5: Ukázky řezání plazmou [13]

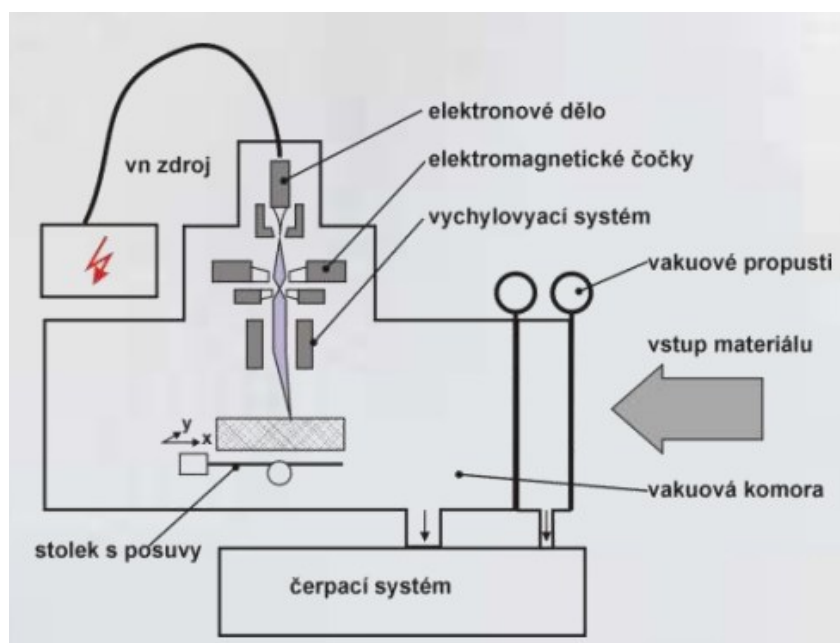
1.4.3 Řezání paprskem elektronů

Toto obrábění je založeno na využití kinetické energie proudu urychlených elektronů, které dopadají na obráběný materiál.



Obr. č. 6: Princip řezání paprskem elektronů [16]

Princip této metody je dopad svazku elektronů, kde v místě dopadu se jejich kinetická energie mění v energii tepelnou a díky vysoké kinetické energii elektronů proniká hluboko do materiálu. Materiál se taví a postupně odpařuje. Tepelná energie, která je pod povrchem koncentrována způsobuje odpařování materiálu. Malé částice vypařujícího se materiálu se pohybují vysokou rychlostí z otvoru ven. Páry odpařeného materiálu jsou zionizovány a způsobí nové zaostření paprsku v pracovním místě. Opakováním tohoto procesu dojde k úběru materiálu. [11], [16]



Obr. č. 7: Schéma zařízení [16]

Obrobitelnost materiálu svazkem elektronů nezávisí na mechanických vlastnostech, ale je dána jejich fyzikálními vlastnostmi. Elektronový paprsek lze použít u těžkoobrobitelných materiálů:

- Slitin zinku s niobem
- Žárupevných ocelí
- Austenitických ocelí
- Drahokamů
- Wolframu
- A různých speciálních slitin, které se používají v kosmonautice a letectví

Hůře obráběné materiály elektronovým paprskem:

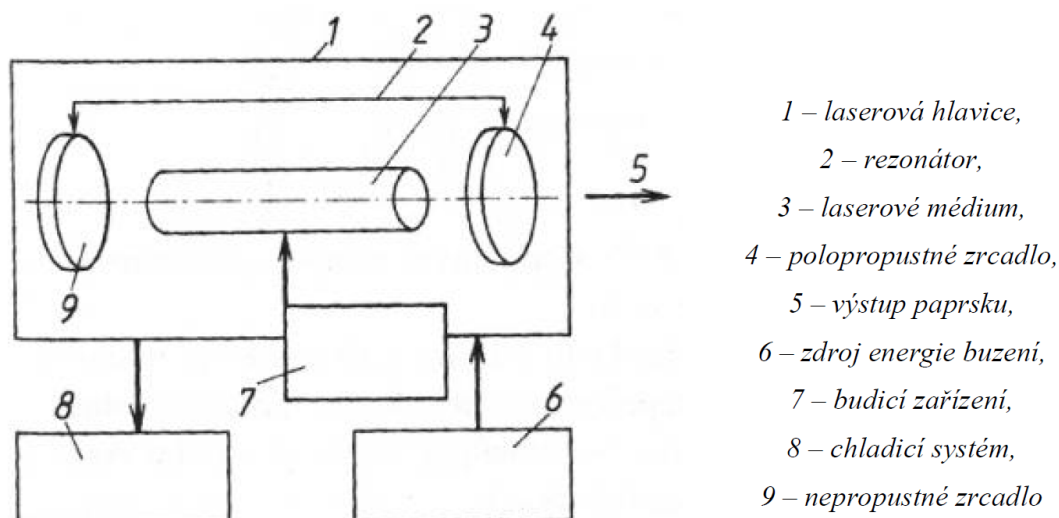
- Mosaz, bronz
- Zinek
- Hořčík

Mezi výhody tohoto tepelného dělení materiálu patří úzká natavená oblast, minimální deformace, široká škála řezaného materiálu. Hlavní nevýhodou této metody jsou vysoké pořizovací náklady samotného zařízení, vysoké nároky na čistotu povrchu, nutnost vakua a dlouhý čas jeho čerpání. [16]

1.4.4 Řezání laserem

Pojem LASER vychází z počátečních anglických slov- **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, což v překladu znamená- zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření.

Laser pracuje na principu indukované emise, tzv. vynuceného záření. Indukovaná emise je vyvolána dopadem záření na atom prvku, kdy záření donutí elektron obíhající kolem jádra přijmout energii a tím vystoupat na vyšší oběžnou dráhu. Další příjem energie a rovnováha sil v atomu přinutí elektron vrátit se na svoji původní oběžnou dráhu a vyzářit přijatou energii do prostoty. Vzniklé záření je monochromatické a koherentní, to znamená, že záření se pohybuje ve svazku a jedním směrem a jsou pravidelně rozděleny. [1], [11]



Obr. č. 8: Schéma zařízení laseru [1]

1.4.4.1 Rozdělení laseru

Rozlišujeme tři základní typy laseru podle aktivního prostředí

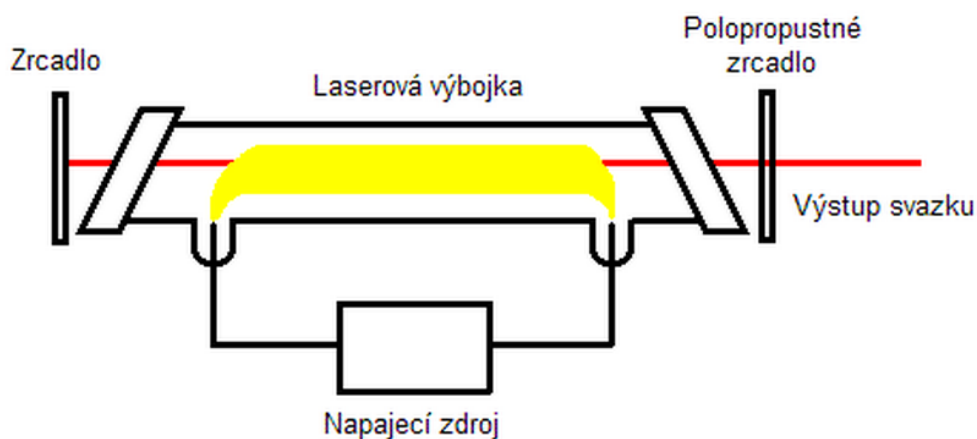
- Plynové
- Pevnolátkové
- Polovodičové

Plynové lasery

U těchto laserů vzniká paprsek v plynném prostředí, kde nejčastějším plynem je argon, neon nebo helium. Plynové lasery většinou pracují v kontinuálním režimu a plynné prostředí je obecně homogennější než například pevné prostředí, proto je rozbíhavost generovaného svazku menší. Plynné aktivní prostředí má menší hustotu aktivních částí, z toho vyplývá relativně menší objemová hustota výkonu, pro dosažení velkého výstupního výkonu je potřeba využít velkého objemu aktivního prostředí. Plynové lasery můžeme budit rozličnými metodami- elektrický výboj, chemická reakce anebo fotodisociací. [14], [17]

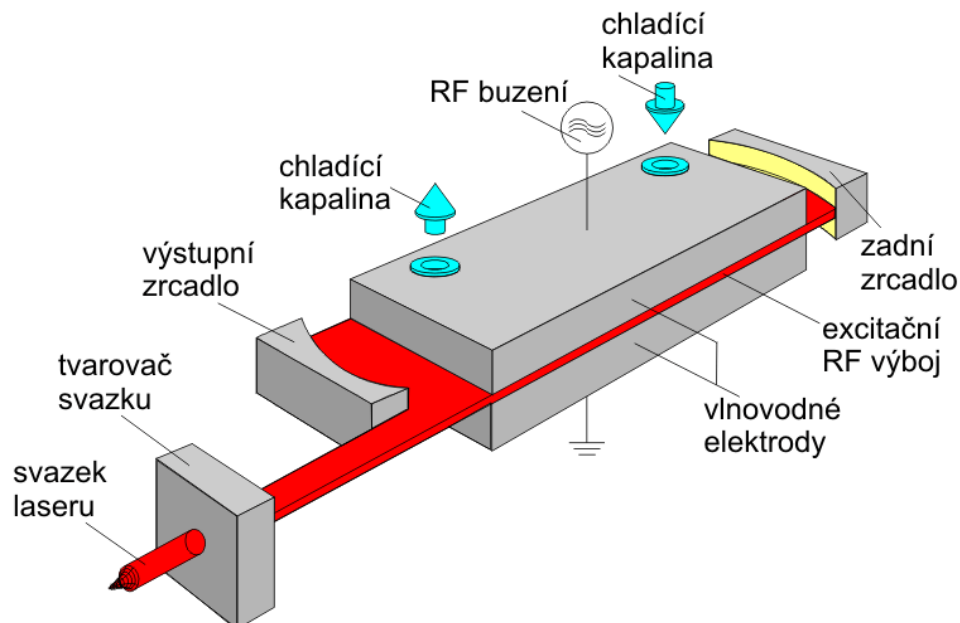
Druhy plynových laserů:

- Heliumneonový laser- atomy neonu ve směsi s heliem v poměru He:Ne= 5-15:1, kde tlak je až 300 Pa. Aktivní prostředí je tvořeno vybuzenými atomy neonu. Budí se v elektrickém výboji ve směsi plynů helia a neonu. Tento laser se používá v měřicí technice, holografii a geodézii.



Obr. č. 9: Heliumneonový laser [17]

- **Argonový laser-** Ionty argonu vytváří aktivní prostředí. Buzení je prováděno silnoprůdným elektrickým výbojem. Možnost volby až z 9 vlnových délek. Použití v medicíně (léčba tkání fotokoagulací), průmysl (lithografie), věda. [17]
- **Excimerový laser-** Aktivním prostředím jsou excimery. Excimer je nestabilní dvouatomová molekula vzácného plynu, která vzniká jen na přechodnou dobu v důsledku vzájemného působení vybuzeného atomu s atomem v základním stavu. Buzení se provádí elektrickým výbojem nebo svazkem rychlých elektronů. Používají se v lékařství tak i průmyslu, při technologických aplikacích (popisování součástí). [17]
- **CO₂ laser-** Aktivní prostředí- molekuly kysličníku uhličitého ve směsi dusíku, hélia v poměru-1:2:8 (1:4:5). Buzení je elektrickým výbojem, který zapaluje směs plynů CO₂, N₂ a He. Používají se pro řezání, vrtání, nanášení povlaků, tepelné zpracování a popisování součástí. [17]

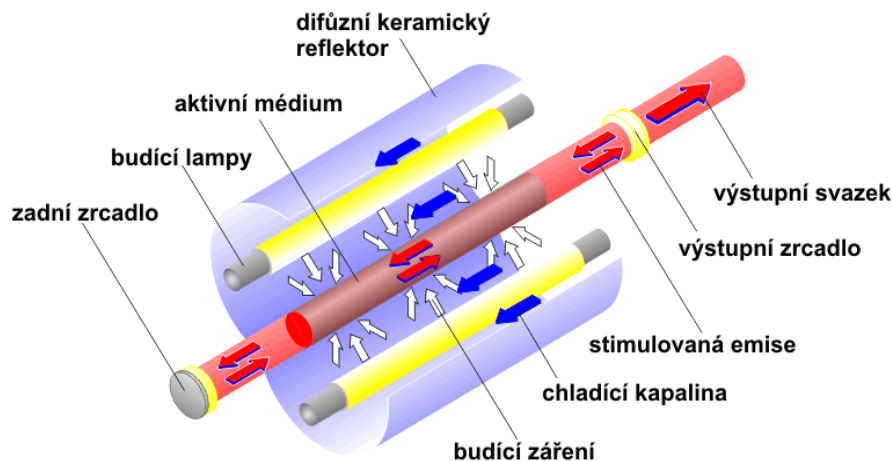
Obr. č. 10: Schéma plynového CO₂ laseru [14]

Pevnolátkové lasery [1], [11], [19], [20]

Další skupinu laseru tvoří pevnolátkové lasery. Aktivním prostředím je v tomto případě vytvořený homogenní krystal s příměsí cizorodé látky. Světelná emise vzniká vystavením krystalu silnému stálému externímu světelnému výboji. Nejpoužívanější typem toho druhu laseru je Nd:YAG.

Druhy pevnolátkových laserů:

- **Rubínový laser** - Tento laser využívá za aktivní prostředí krystal generující záření o určité vlnové délce. Většinou pracuje v pulzním režimu. Používá se většinou pro obrábění tvrdých materiálů, v lékařství a dermatologii.
- **Nd:YAG laser** - V dnešní době je tento typ pevnolátkového laseru nejpoužívanější. Aktivní prostředím je krystal yttriumaluminogranát dopovaný neodymem. Pracuje jak v režimu pulzním, tak v kontinuálním režimu. Chladicí médium se zde používá voda. Tento laser dosahuje výkonu až 5 kW. Tyto lasery v současnosti nahrazují CO₂ lasery díky svým nižším servisním nákladům. Používá pro řezání, svařování, vrtání a žihání. V lékařství se používají v chirurgii jako skalpel, tak v oční chirurgii.



Obr. č. 11: Schéma Nd:YAG laseru [15]

- **Nd:sklo laser** - Užívá se pro vysokoenergetické pulzní režimy práce s malou opakovací frekvencí. Pracuje v pulzním režimu.
- **Nd:YLF laser** – aktivním prostředím je LiYF₄.
- **Er:YAG laser** – aktivní prostředí pro Er iont tvoří YAG, používá se v laserových dálkoměrech.

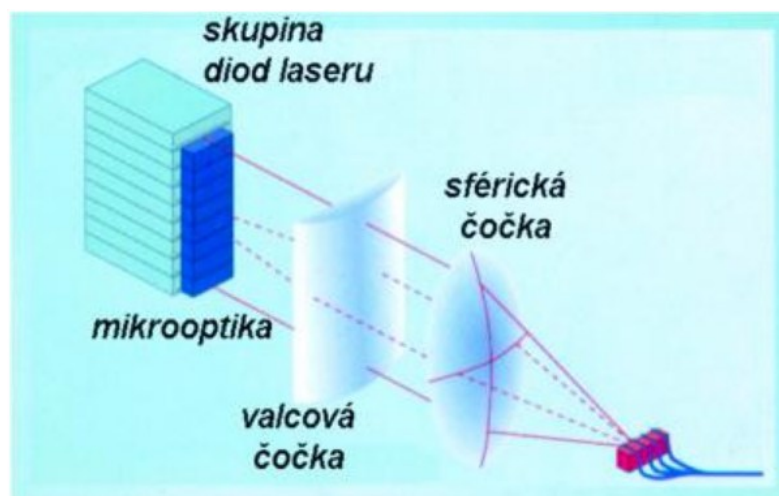
Polovodičové lasery

Jedná se o nejnovější a poslední skupinu laserů, obecně jsou známy pod názvem laserové diody. Světelná emise vzniká v tenké přechodové vrstvě na hranici mezi polovodiči typu P a N. Atomy v přechodové vrstvě absorbují energii z elektrického proudu protékající diodou, díky níž pak přecházejí do vyšších energetických hladin. Při sestupu na svou původní hladinu vyzáří zbylou nadbytečnou energii, v podobě světla a tepla. Můžeme dosáhnout účinnosti až okolo 45 %. Kvalita a použitelnost laserové diody je závislá na správném výběru materiálů obou polovodičů a na udržení tloušťky přechodové vrstvy, ta by měla být co nejtenčí. [1], [20], [21]

Druhy polovodičových laserů:

- **Diodový laser** – Aktivní prostředí je tvořeno blokem polovodičů. Buzení laseru může být fotony, elektrickým polem nebo častěji svazkem elektronů. Výkon na výstupu se pohybuje v rozmezí 30W až 8kW. Patří zde galiumarsenidový (GaAs) polovodičový laser, kadmiumselenidový (CdSe) a kadmiumsulfidový (CdS) polovodičový laser.

Diodové vysoce výkonné lasery mají výstupní paprsek ve tvaru obdélníkové plochy. [21]



Obr. č. 12: Schéma polovodičového laseru [1]

- **Injekční polovodičové lasery** – v tomto případě je buzení prováděno přiložením elektrického polo k polovodičovému přechodu. Aktivní materiál je složen z polovodičů P a N. Princip je podobný tzv. LED diodám, rozdíl je však v záření, které je generováno stimulovanou energií. Nejznámější je GaAs polovodičový laser. Výkon těchto laserů se pohybuje v řádech wattů. Používají se například jako laserové ukazovátko, nebo v medicíně pro vyřezávání kožních anomálií. [1], [20]

1.4.4.2 Metody řezání laserem

Dělíme do tří skupin: tavné, oxidační, sublimační

- **Tavný režim** – u tohoto dělení se materiál zahřeje na teplotou varu laserovým svazkem a vzniklá tavenina se od základního materiálu oddělí proudem inertního plynu, nejčastěji dusíku, který se do místa řezu přivádí, ale na samotném procesu se nepodílí. Plyn však musí být hnán tlakem okolo 10 až 15 Bar. Rychlost řezání ve srovnání s ostatními metodami je relativně pomalá. Maximální řezná rychlost stoupá lineárně s výkonem laseru a snižuje se přibližně lineárně s tloušťkou řezaného materiálu, naproti tomu jsou řezné plochy kvalitní, s kovovým leskem a bez okují. Tento režim je využíván pro řezání neželezných kovů a jejich slitin, vysokolegovaných ocelí a nekovových materiálů (keramika, dřevo). [1], [11], [19]

- **Oxidační režim** – laserovým svazkem je materiál ohříván na teplotu tání. Do natavené oblasti se na rozdíl od tavného režimu přivádí kyslík o tlaku 0,5 až 1,5 barů. Účinek kyslíku s roztaveným povrchem kovu vzniká exotermní reakce. Takto dodané teplo má za následek další ohřívání materiálu. Díky tomuto efektu lze dosáhnout u konstrukčních ocelí vysokých řezných rychlostí až desítek m/min. Řez ale není kvalitní, je širší, s vyšší drsností a velkou tepelně ovlivněnou oblastí. Tento režim není vhodný pro řezání malých otvorů a ostrých geometrických tvarů. Zlepšení kvality řezu můžeme dosáhnout regulací výkonu laseru, který optimalizujeme podle tloušťky materiálu. Řezná rychlost je pak omezena sníženým výkonem laseru. [1], [11],
- **Sublimační režim** – způsob řezání, kde pulzní laserový paprsek o vysoké hustotě energie zahřívá materiál v místě řezu na teplotu varu, materiál se následně odpařuje. Tloušťka řezaného materiálu nesmí překročit průměr paprsku, aby páry materiálu znovu nezkondenzovaly a nesvařily řez. Páry můžeme odstranit proudem inertního plynu o nízkém tlaku, jako inertní plyn se nejčastěji používá dusík nebo argon. Tento způsob řezání vyžaduje dokonalé nastavení optiky v závislosti na tloušťce materiálu. Tento způsob je energeticky nejnáročnější, výsledek jsou hladké rovné plochy díky absenci taveniny. Nejčastěji se využívá pro vrtání a řezání minerálů, tenkých plechů nebo dřeva. [1], [11], [19]

1.4.4.3 Řezné parametry

Řeznými parametry se upravuje samotný proces řezání. Můžeme je dělit na samotné parametry procesu řezání a parametry materiálu. [1], [4]

Mezi základní parametry procesu řezání laserem zahrnujeme:

- **Výkon laseru** – je jedním z nejdůležitějších parametrů. Závisí na provozním režimu tloušťce a druhu řezaného materiálu. [1]
- **Řezná rychlost** – závisí na výstupním výkonu paprsku laseru, druhu a tloušťce řezaného materiálu a v neposlední řadě i požadované kvalitě řezu. Špatně zvolená rychlost potom vede k vadám (vysoká drsnost, otřepy) [1]
- **Kvalita řezu** – dosahuje se parametru drsností Ra 3,6 až 12, hodnotíme je podle jakosti řezané plochy a tloušťky tepelně ovlivněné oblasti. [4]
- **Typ a tlak řezného plynu** – Druh a tlak plynu určujeme z použité metody řezání a tedy i druhem řezaného materiálu. Důležitou roli hraje i čistota ochranného plynu,

kteřá se podepíše na výsledné drsnosti materiálu. Tlak pracovního plynu volíme s ohledem na způsobu dělení a tloušťce řezaného materiálu. Při nízkém tlaku hrozí špatné vyfukování taveniny z místa řezu a ta se přichycuje na spodní hraně řezaného materiálu, vysoký tlak nám způsobuje víření a dochází k velkému rozstříku taveniny. [1]

- **Šířka řezné spáry** – záleží na tloušťce a druhu řezaného materiálu.
- **Poloha ohniska vzhledem k materiálu** – závisí na metodě řezání a tloušťce materiálu. Polohu nastavujeme ručně nebo automaticky pomocí optických čidel. Je to vlastně vzdálenost od čočky do ohniska paprsku. [4]
- **Odstup a průměr trysky** – odstup trysky od materiálu by měl být co nejmenší, ale dost velký, aby tryska a optika laseru nebyla znehodnocována rozstříkem taveniny. Vzdálenost se pohybuje v rozmezí 0,1 – 2,5 mm od plochy materiálu. Průměr trysky se v praxi volí v rozmezí 1 – 2,5 mm. [1], [4]
- **Režim práce laseru (kontinuální/pulzní)** – Pro kontinuální režim je podstatný aktuální výkon, u pulzního režimu to je opakovací frekvence (množství pulzů za určitou jednotku času). [1]

1.4.4.4 Vady řezu

I u tepelného dělení materiálu vznikají na povrchu řezu vady. Tyto vady vznikají špatně nastavenými řeznými parametry, vadami uvnitř materiálu nebo jako průvodní jev laserového dělení. Vady se mohou vyskytnout i nesprávně seřízenou optickou soustavou, například zakřivením čočky přehřátí nebo její znečištění. Mohou nastat tyto vady. [4]

Pitting – narušuje nám sourodost plochy řezu, v českém překladu je to povrchová eroze. Vzniká při změně směru řezání, nebo vměstků v materiálu. Vyznačuje se nejednotnou hloubkou, šířkou nebo formou eroze. [4]

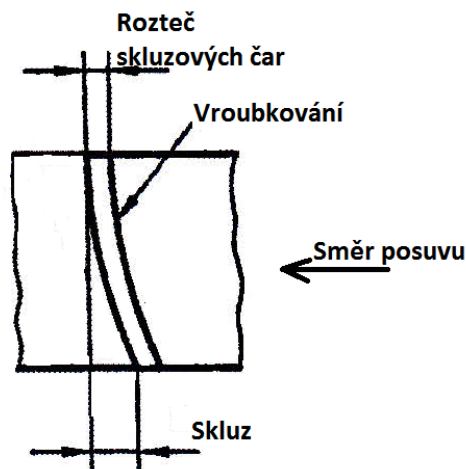
Otřepy – jsou z jedním nejčastějších vad materiálu. Obvykle vznikají na spodní části řezaného materiálu, tavenina ulpívá a chladne. Odstraňujeme obvykle broušením nebo frézováním. Mezi základní druhy otřepů patří: slzovité, struskovité, špičaté. [4]

Tvar a šířka řezné spáry – s rostoucí tloušťkou materiálu se zvětšuje šířka řezu, kde záleží na:

Ohniskovém průměru, druhu materiálu a jeho tloušťce, typ laseru, vlnové délce a postupu řezání. [4]

Drsnost povrchu – Další důležitá vada řezu. Nadměrná drsnost je způsobena špatně nastavenými reznými parametry, nebo použitím nevhodného materiálu. Mezi hrubé chyby můžeme zařadit nevhodnou metodu laserového dělení, či špatně zvolený ochranný plyn. Mezi důležité parametry ovlivňující povrch jsou: rychlost posuvu, tloušťka a druh materiálu. [4]

Skluz – Průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání. [4]



Obr. č. 13: Schéma skluzu [18]

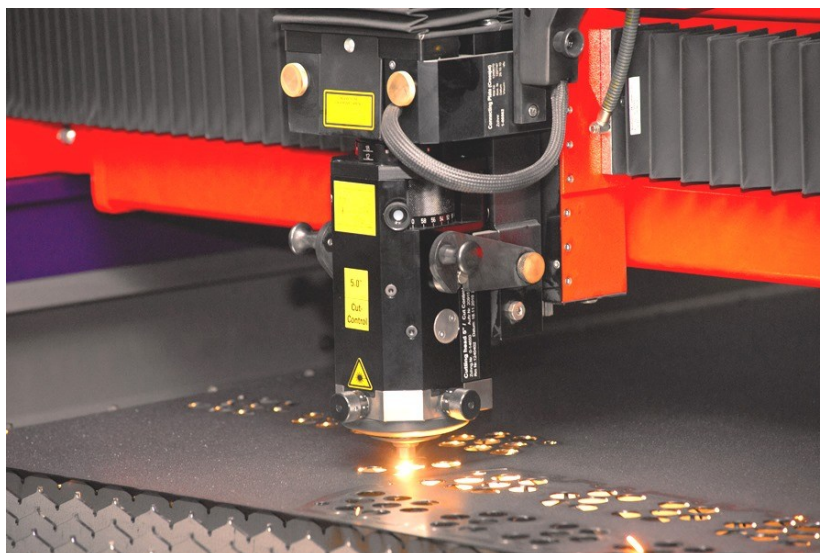
1.4.4.5 Výhody a nevýhody laserového řezání [1]

Výhody:

- Vysoká přesnost řezaných materiálů u tenkých a středních tloušťkách.
- Řezná hrana je kolmá vůči povrchu
- Řezání malých otvorů, tvarů s ostrými úhly, úzkých pásků
- Nízké deformace řezaného kusu, díky malému množství přivedeného tepla
- Vysoká rezná rychlost
- Malá šířka rezné spáry
- Možnost řezat téměř všechny materiály

Nevýhody:

- Vysoké provozní a prvotní náklady
- Malé účinnosti
- Snížení stability procesu u řezání lesklých povrchů
- Nutné přesně řízení vzdálenosti k povrchu řezaného materiálu
- Omezení tloušťky materiálu: -konstrukční ocel do 25 mm
-vysokolegovaná ocel do 15 mm
-hliník do 10 mm.



Obr. č. 14: Pracovní prostor laseru

2. Návrh metodiky měření přesnosti laseru

Diplomová práce se věnuje analýzou přesnosti laseru ve firmě NC line s.r.o. Tato firma se zabývá zpracováním plechů dle požadavku zákazníka na CNC strojích – CNC pálení laserem, CNC vysekáváním na vysekávacím stroji, ohýbání na CNC ohraňovacích lisech, výrobou barviček prádla vlastní konstrukce, výrobou a vývojem dílů pro manipulační a topenářskou techniku, výrobou grilů vlastní konstrukce a zakázkovou vývojovou činností. Dodáváme plechové díly pro zákazníky z České republiky, ale také z Německa, Anglie, Belgie, Francie, Holandska nebo Dánska. V současné době tvoří více jak 70% odbytu export do těchto zahraničních zemí.[5]

Cílem firmy je dodávat přesné a precizní díly ve stanovené kvalitě na požadavek zákazníka. Řízení jakosti v NC line od srpna roku 2000 certifikováno. Systém managementu jakosti společnosti NC line byl schválen společností Lloyds Register Quality Assurance dle EN ISO 9001:2000. [5]

Firmu v roce 1993 založilo 7 společníků. Do firemního rejstříku byla zapsána 19. července 1993 u Krajského soudu v Ostravě. Po založení v roce 1993 začala výrobou plechových dílů na zakázku pro firmu ROMOTOP (výrobce krbových kamen) S rostoucími zkušenostmi, vysokou kvalitou a spolehlivostí se firmě podařilo v krátké době získat portfolio českých odběratelů a začala postupně navyšovat své kapacity postupným rozšiřováním strojního parku a narůstajícím počtem zaměstnanců. V roce 1995 se tři společníci rozhodli ze společnosti vystoupit. V současné době má firma 4 společníky, každý z nich vlastní 25% podílu. Za dobu své působnosti se společnost rozrostla ve středně velkou prosperující firmu. V roce 1996 se majitelé rozhodli ke strategii expanze rozšířením na západoevropský trh a postupem času získala zahraniční zákazníky (Německo, Anglie, Holandsko, Belgie, Dánsko ...atd.). Začátkem ledna 1999 byla ukončena dostavba nové haly pro práškovací linku a nové skladové prostory. V březnu 1999 byla provedena kolaudace linky na nanášení práškového plastu (prášková technologie) včetně předúprav (Zn fosfátování). Dalším důležitým mezníkem pro firmu bylo získání certifikátu ISO 9002 v srpnu roku 2000 od auditorské firmy Lloyd. V přílohách naleznete kopii certifikátu: Certifikát DIN EN ISO 9002. V červnu 2001 byla dokončena výstavba nové haly (100 x 60 m), která ukončila dlouhodobou snahu uzavřít co nejlepší využití technologického toku výrobků a rozšířit další prostory pro umístění nových strojů. Firma spolupracuje s více jak 300 zákazníky a v roce 2005 bylo 12 strategických a 30 hlavních zákazníků, kteří tvořili většinu obratu společnosti. V posledních 5-ti letech firma sledovala strategii expanze (expansion strategy), kde jednotlivá strategická rozhodnutí byla

přímo zaměřená na rozšiřování stávajících oblastí podnikání, kdy se konkrétně investovalo do lidského kapitálu, nových technologií (jak výrobních, tak informačních) a výrobních prostorů. Firma NC Line je díky svému rozvoji schopna nadále plně uspokojovat potřeby zákazníků, udržet vysokou flexibilitu a kvalitní odborné a technické zabezpečení při zpracování předkládaných projektů.

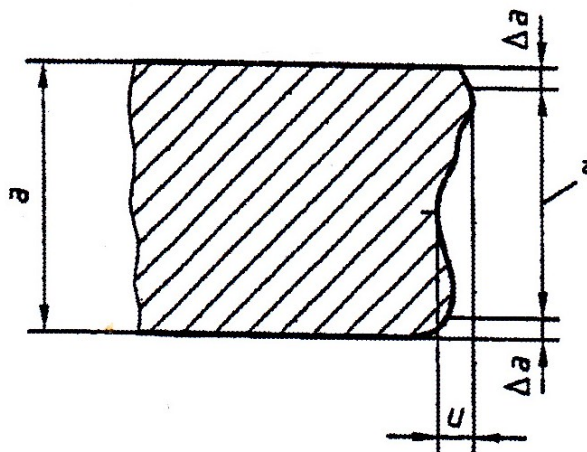
2.1 Jakost povrchu řezu

Kvalita povrchu řezu tepelně dělených materiálů je popsána následujícími charakteristickými veličinami:

- Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka
- Průměrná výška prvků profilu, Rz5. [4]

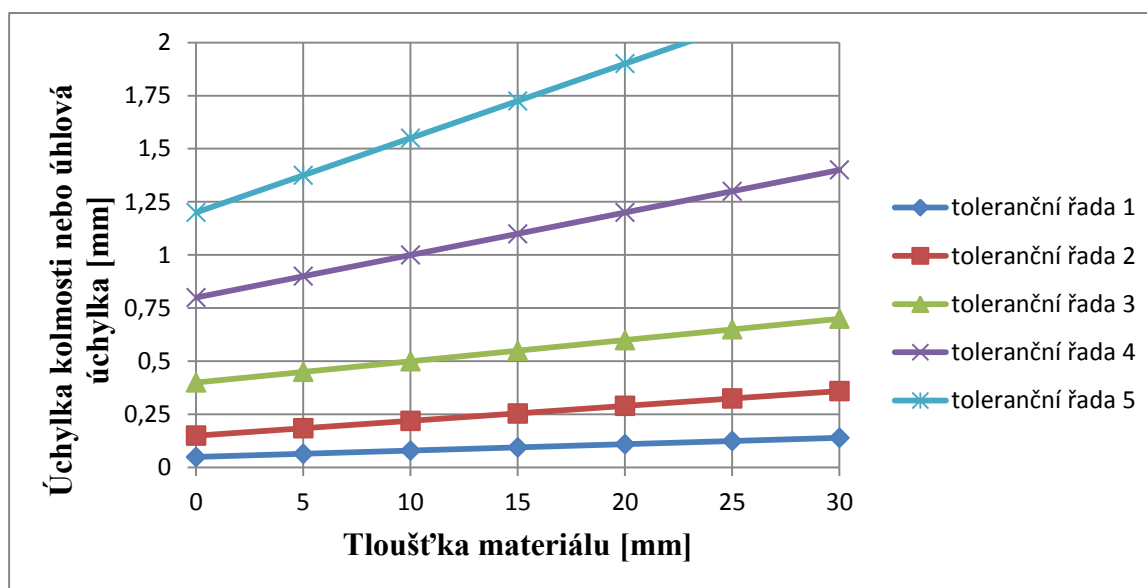
2.1.1 Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka

Měření kolmosti nebo úhlové úchylky se provádí jen v určité oblasti povrchu řezaného materiálu. Oblast se zmenší o vzdálenost Δa , od horní a dolní hrany řezu z důvodu dovoleného natavení horní hrany řezu.



Obr. č. 15: Měření dráhy pro měření úchylky kolmosti [18]

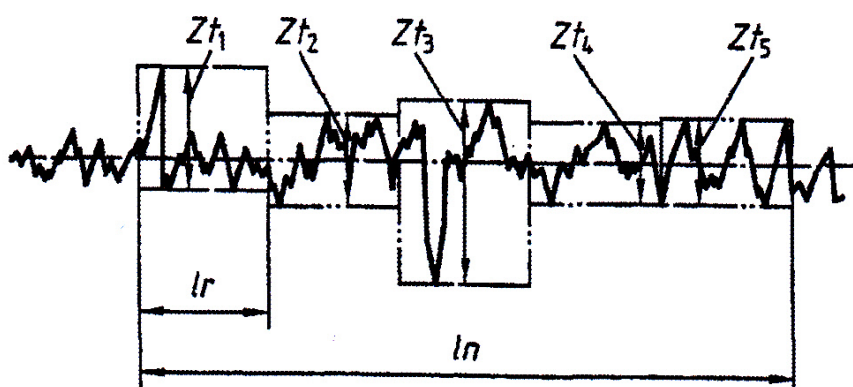
Pro přesné měření je normou předepsáno vodící zařízení ve směru tloušťky řezu a jmenovitého úhlu s číselníkovým úchylkoměrem, úhel dotykového hrotu je menší nebo roven 90° . Poloměr zaoblení dotykového hrotu je roven 0,1 mm. Mezní hodnota chyba je rovna 0,02 mm. Pro hrubá měření se používá příložný úhelník s třídou přesnosti 1 nebo 2. Pro šikmé řezy měřidlo sklonu nebo úhломěr, měřicí drát, lístkové spárové měrky. [4]



Obr. č. 16: Graf pro úchylku kolmosti nebo úhlovou úchylku pro toleranční pole 1-5 [18]

2.1.2 Drsnost

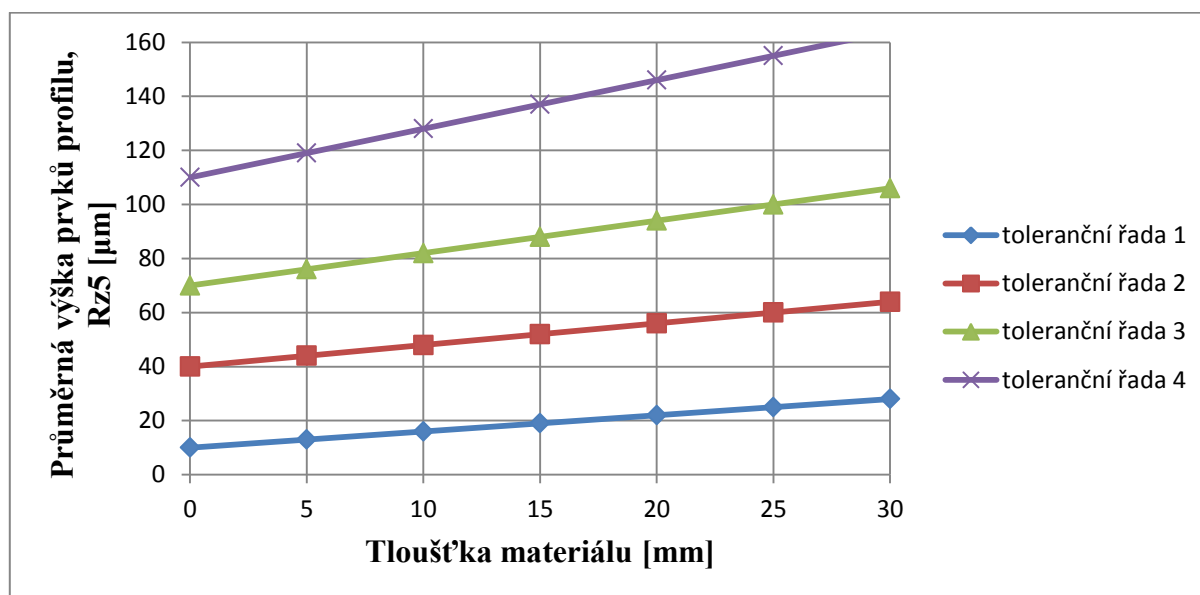
U měření drsnosti určujeme dva parametry- Výšku prvku profilu, Z_t a průměrnou výšku prvků profilu, $Rz5$. Z_t je součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu. $Rz5$ je aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu na pěti za sebou následujících základních délka. Index 5 je přidán, aby se odlišila průměrná výška profilu a největší výška profilu z pěti jednotlivých prvků profilu. [3], [4]



Obr. č. 17: Parametr Rz5 [4]

Charakteristická hodnota průměrné výšky prvků profilu $Rz5$ je stanovena pouze v omezené oblasti povrchu řezu. Měření musí být prováděno v místě, kde očekáváme maximální drsnost povrchu řezné tloušťky. Pro technologii řezání laserem se měření provádí v horní třetině od horní hrany řezu. U tlouštěk řezu, které jsou menší jak 2 mm je měření

prováděno v polovině tloušťky řezu od horní hrany řezu. V normě je předepsáno měřidlo pro přesné měření, tj. elektrických dotykový hrotový přístroj pro souvislé snímání ve směru řezání.



Obr. č. 18: Graf pro průměrnou výšku profilu-Rz5 pro toleranční pole 1-4 [18]

2.1.3 Rozměrové úchytky

Rozměry na výkresech se musí považovat za jmenovité rozměry, skutečně rozměry se určují na očištěném povrchu řezu. Pro řезы provedené laserem závisí dosažené úchytky v podstatě na geometrii a předběžné úpravě řezaného materiálu. Úchytky pro kvalitu povrchu řezu jsou posuzovány odděleně od mezních úchylek pro rozměrové úchytky řezaného kusu, aby se zdůraznily rozlišné vlivy na rozpracovaný kus. Tabulky mezních jmenovitých rozměrů jsou v normě ve dvou tolerančních třídách (třída 1 a třída 2) a závisí tloušťce řezaného kusu a na velikosti jmenovité hodnoty. [4]

2.2 Použitá zařízení a měřidla

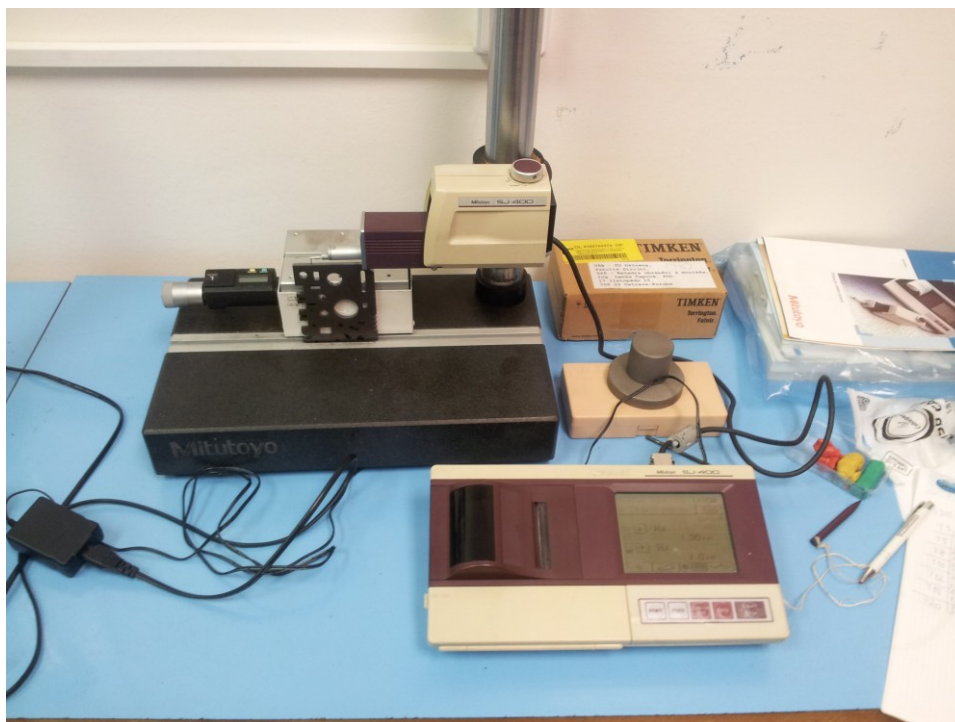
2.2.1 Měření drsnosti

Samotné měření bylo prováděno na přístroji SurfTest SJ – 400 , který je vyobrazen na obrázku č. 19. Jedná se o příruční drsnoměr s širokými možnostmi nastavení. Měření bylo prováděno na Vysoké škole Báňské Technické univerzity v Ostravě. Postup měření spočíval v sestavení drsnoměru, jeho ustavení a uvedení v provoz, poté se mohly jednotlivé vzorky ustavit a mohlo započít měření.

Tabulka č. 2: Parametry drsnoměru Surftest SJ – 400

Drsnoměr Surftest SJ - 400	
Přejezdová rychlost [mm/s]	0,5; 1,0; 2,0
Parametry drsnosti	Ra, Ry, Rz, Rq, RPc, atd.
Typ tiskárny	Termální, šířka tisku 48 mm
Příkon [W]	43
Normy drsnosti	JIS, DIN, ISO, ANSI
Displej	Dotykový
Výstup dat	Připojení k systému zpracování dat
Hmotnost [kg]	2

Celé pracovní prostředí je zobrazeno na obr. č. 19. Je složeno z měřicího stojanu s nastavitelnou výškou až 200 mm o rozměrech 400x250x550 mm. Součástí je vyrovnávací stolek s max. zatížení 15 kg a výstup dat pro odečtení parametru drsnosti.



Obr. č. 19: Pracovní prostředí měření drsnosti

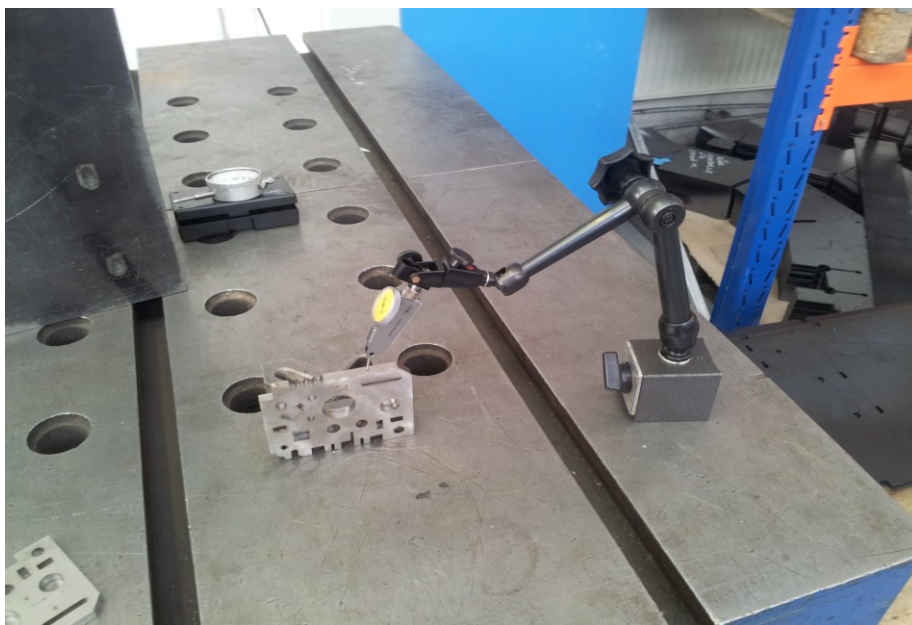
2.2.2 Měření úchylky kolmosti

Samotné měření úchylky kolmosti bylo prováděno ve firmě NC line s.r.o. Měření spočívalo v ustavení a za polohování vůči měřené součásti, následně jsme páčkový úchylkoměr posouvaly ve směru tloušťky řezu. Pro toto měření byl použit páčkový úchylkoměr MarTest 800s, který má přesnost 0,01 mm.

Tabulka č.3: Parametry Páčkového úchylkoměru MarTest 800s

MarTest 800s	
Rozsah měření [mm]	+/- 0,4
Číselník	0-40-0
Dělení stupnice [mm]	0,01
Měřicí síla [N]	0,15
Průměr číselníku [mm]	27,5

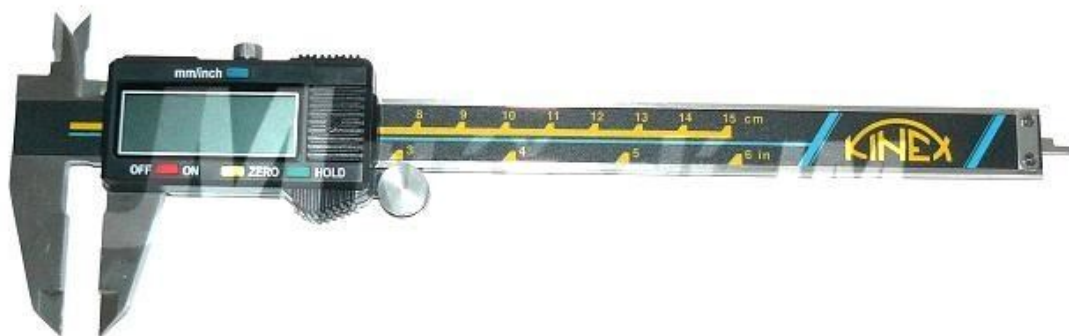
Pracovní prostředí je zobrazeno na obrázku č. 20. Skládá se z měřícího stojanu, který má otočný držák a podstavec s prizmatickým zářezem. Celková výška je 150 mm, plocha podstavce – 65x40 mm.



Obr. č. 20: Pracovní prostředí měření úchylky kolmosti

2.2.3 Měření jmenovitých rozměrů

Měření jmenovitých rozměrů probíhalo ve firmě NC line, s.r.o. Pro toto měření bylo použito posuvné měřítko od výrobce KINEX s rozsahem 0-150 mm s velkým displejem a možnou aretací šroubkem.

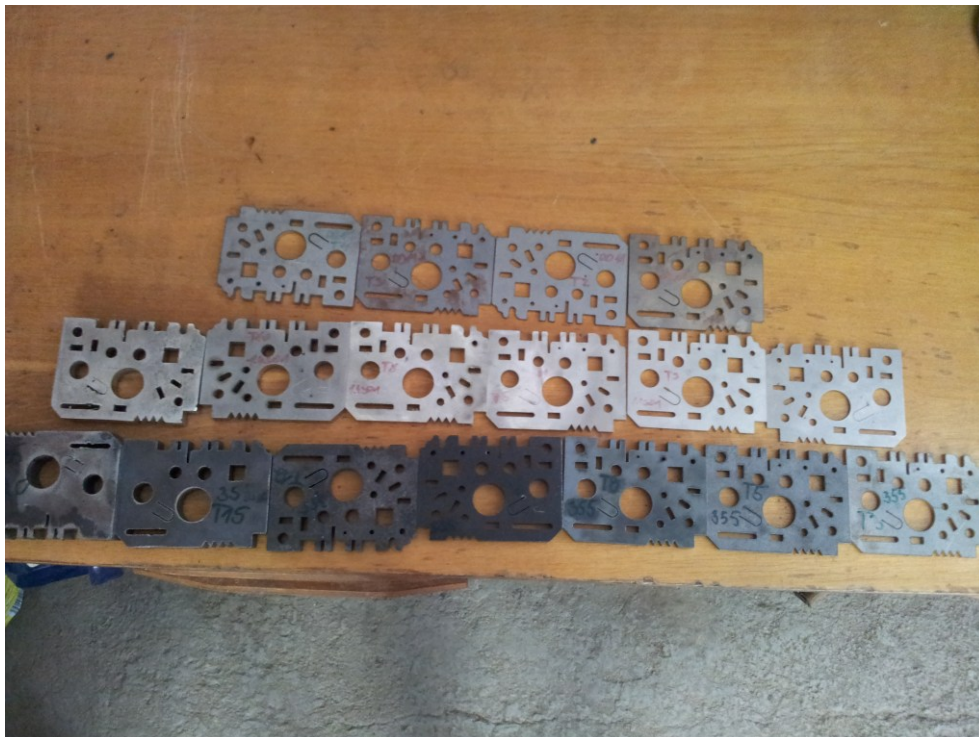


Obr. č. 21: Posuvné měřítko KINEX

3 Zpracování výsledků měření přesnosti laseru

Praktická část této práce je věnována měřením a vyhodnocením výsledků měření. Jde o měření drsnosti, úchytky kolmosti a rozměrovým úchytkám řezaných hran laserem. Pro měření byly použity tyto typy materiálů:

- Konstrukční ocel běžné jakosti, S235JRC, tloušťka materiálu 3 – 20 mm.
- Konstrukční ocel jakosti, S355MC, tloušťka materiálu 3 – 20 mm.
- Konstrukční ocel válcovaná za studena, DC01, tloušťka materiálu 2 – 3 mm.
- Oceli vyráběny válcováním za tepla, DD11, tloušťka materiálu 2 – 4 mm.
- Korozivzdorná ocel, X5CrNi18-10, tloušťka materiálu 1-12 mm.



Obr. č. 22: Všechny měřené vzorky seřazené do skupin

Každý druh materiálu obsahuje vzorky o různé tloušťce materiálu a to v celkovém rozmezí 2 – 20 mm. Vzorky byly pořízeny ve firmě NC line na plynovém laseru od firmy Trumf. Parametry laseru jsou v tabulce č. 2.

Tabulka č. 4: Parametry laseru Tru Flow 5000 [5]

TRUMF TruLaser L5030 – TruFlow 5000			
Výkon [kW]	Rozměr stolu [mm]	Posuvová rychlost [m/min]	Max.tloušťka plechu
5	1500x3000	15	Konstrukční ocel-25 mm Korozivzdorná ocel-12 mm



Obr. č. 23: Laser TruFlow 5000 [5]

3.1 Výsledky měření vzorku z konstrukční oceli S235JRC

3.1.1 Výsledky parametru drsnosti Ra a Rz5

Tabulka č. 5: Naměřené hodnoty parametru drsnosti pro konstrukční ocel S235JRC

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Parametr drsnosti	Hrana č.1	Hrana č.2	Hrana č.3	Hrana č.4	Průměrná hodnota
3	Ra	2,17	2,25	2,31	2,35	2,27
	Rz5	15,10	15,70	16,3	17,0	16,03
5	Ra	0,82	0,93	0,77	1,59	1,03
	Rz5	5,10	5,30	4,20	8,20	5,70
8	Ra	1,13	1,39	1,53	1,77	1,46
	Rz5	5,61	6,11	6,47	7,13	6,33
10	Ra	4,67	4,71	4,75	4,95	4,77
	Rz5	27,40	28,12	28,41	29,14	28,27
12	Ra	7,64	7,65	7,88	8,12	7,83
	Rz5	42,74	42,78	43,03	44,22	43,19
15	Ra	14,68	13,91	14,56	15,33	14,62
	Rz5	80,10	77,85	79,83	83,52	80,33
20	Ra	14,77	15,11	15,13	16,08	15,28
	Rz5	80,21	82,65	82,71	85,04	82,66

3.1.2 Výsledky parametru úchylky kolmosti u

Tabulka č. 6: Naměřené hodnoty úchylka kolmosti pro konstrukční ocel S235JRC

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Úchylka kolmosti	Hrana č. 1	Hrana č. 2	Hrana č. 3	Hrana č. 4	Průměrná hodnota
3	u	0,12	0,14	0,11	0,15	0,13
5	u	0,16	0,14	0,18	0,15	0,16
8	u	0,19	0,17	0,16	0,20	0,18
10	u	0,27	0,25	0,22	0,23	0,24
12	u	0,28	0,26	0,23	0,31	0,27
15	u	0,32	0,29	0,31	0,30	0,31
20	u	0,44	0,47	0,46	0,43	0,45

3.2 Výsledky měření vzorku z konstrukční oceli S355MC

3.2.1 Výsledky parametru drsnosti Ra a Rz5

Tabulka č. 7: Naměřené hodnoty drsnosti pro konstrukční ocel S355MC

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Parametr drsnosti	Hrana č.1	Hrana č.2	Hrana č.3	Hrana č.4	Průměrná hodnota
3	Ra	1,29	2,17	1,45	1,97	1,72
	Rz5	8	15,30	9,25	13,97	11,39
5	Ra	1,45	2,17	1,58	2,13	1,83
	Rz5	8,62	15,35	9,78	14,98	12,18
8	Ra	4,26	4,35	4,44	4,25	4,36
	Rz5	24,81	25,23	26,78	24,74	26,14
10	Ra	5,74	5,83	5,77	5,91	5,81
	Rz5	32,11	35,37	33,09	36,29	34,22
12	Ra	7,64	6,93	7,81	7,03	7,36
	Rz5	43,07	39,88	47,08	41,54	42,89
15	Ra	14,56	14,98	14,55	15,07	14,79
	Rz5	79,87	81,56	80,07	82,98	81,12
20	Ra	15,44	15,78	15,50	15,83	15,64
	Rz5	83,56	85,78	84,11	85,99	84,86

3.2.2 Výsledky parametru úchylky kolmosti u.

Tabulka č. 8: Naměřené hodnoty úchylky kolmosti pro konstrukční ocel S235JRC

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Úchylka kolmosti	Hrana č.1	Hrana č.2	Hrana č.3	Hrana č.4	Průměrná hodnota
3	u	0,06	0,09	0,10	0,07	0,08
5	u	0,14	0,13	0,11	0,12	0,13
8	u	0,18	0,17	0,16	0,22	0,18
10	u	0,28	0,32	0,27	0,26	0,28
12	u	0,27	0,29	0,28	0,31	0,29
15	u	0,32	0,35	0,31	0,33	0,33
20	u	0,42	0,44	0,45	0,42	0,43

3.3 Výsledky měření vzorků materiálu DD11

3.3.1 Výsledky měření parametru drsnosti Ra a Rz5

Tabulka č. 9: Naměřené hodnoty drsnosti pro konstrukční ocel DD11

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Parametr drsnosti	Hrana č.1	Hrana č.2	Hrana č.3	Hrana č.4	Průměrná hodnota
2	Ra	2,50	1,71	2,44	1,93	2,15
	Rz5	15,02	9,70	14,65	11,33	12,68
3	Ra	2,03	2,02	2,14	2,05	2,06
	Rz5	10,02	10,92	11,45	11,04	10,86
4	Ra	4,25	2,94	4,65	3,08	3,73
	Rz5	23,32	16,92	24,48	17,08	20,45

3.3.2 Výsledky měření parametru úchylky kolmosti u.

Tabulka č. 10: Naměřené hodnoty úchylka kolmosti pro konstrukční ocel S235JRC

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Úchylka kolmosti	Hrana č. 1	Hrana č. 2	Hrana č 3	Hrana č. 4	Průměrná hodnota
2	u	0,09	0,11	0,06	0,12	0,09
3	u	0,13	0,15	0,17	0,12	0,14
4	u	0,18	0,21	0,19	0,20	0,20

3.4 Výsledky měření vzorku materiálu DC01.

3.4.1 Výsledky měření parametru drsnosti Ra a Rz5

Tabulka č.11: Naměřené hodnoty drsnosti pro konstrukční ocel DC01

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Parametr drsnosti	Hrana č. 1	Hrana č. 2	Hrana č. 3	Hrana č. 4	Průměrná hodnota
2	Ra	1,42	1,73	1,55	1,81	1,63
	Rz5	8,00	10,72	9,44	11,56	9,93
3	Ra	1,93	2,03	1,99	2,01	1,99
	Rz5	11,82	11,75	12,05	11,98	11,90

3.4.2 Výsledky měření parametru úchylky kolmosti u.

Tabulka č. 12: Naměřené hodnoty úchylka kolmosti pro konstrukční ocel S235JRC

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Parametr drsnosti	Hrana č.1	Hrana č.2	Hrana č.3	Hrana č.4	Průměrná hodnota
2	u	0,12	0,14	0,15	0,11	0,13
3	u	0,22	0,25	0,19	0,18	0,21

3.5 Výsledky měření vzorku korozivzdorné oceli X5CrNi18-10

3.4.3 Výsledky měření parametru drsnosti Ra a Rz5

Tabulka č.13: Naměřené hodnoty drsnosti pro nerez ocel 1.4301

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Parametr drsnosti	Hrana č. 1	Hrana č. 2	Hrana č. 3	Hrana č. 4	Průměrná hodnota
1	Ra	0,95	0,93	0,95	0,97	0,95
	Rz5	5,00	4,92	5,00	6,2	5,28
3	Ra	0,97	0,98	0,98	0,95	0,97
	Rz5	6,38	6,50	6,53	5,12	6,13
5	Ra	1,58	1,08	1,51	1,66	1,46
	Rz5	10,10	9,02	9,88	10,13	9,78
8	Ra	1,89	2,33	1,93	2,21	2,09
	Rz5	11,82	13,21	11,95	12,97	12,49
10	Ra	4	2,94	3,32	2,98	3,31
	Rz5	23,12	24,40	20,69	24,66	23,22
12	Ra	4,71	6,61	5,83	6,33	5,87
	Rz5	26,82	36,5	29,98	32,44	31,43

3.4.4 Výsledky měření parametru úchylky kolmosti u.

Tabulka č. 14: Naměřené hodnoty úchylka kolmosti pro konstrukční ocel S235JRC

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota[μm]					
	Úchylka kolmosti	Hrana č. 1	Hrana č. 2	Hrana č. 3	Hrana č.4	Průměrná hodnota
1	u	0,05	0,04	0,06	0,08	0,06
3	u	0,06	0,09	0,08	0,07	0,08
5	u	0,11	0,13	0,15	0,17	0,14
8	u	0,16	0,14	0,19	0,18	0,17
10	u	0,18	0,21	0,19	0,22	0,20
12	u	0,19	0,22	0,25	0,26	0,23

4 Vyhodnocení vzorků a porovnání s ČSN EN ISO 9013

Pro každý vzorek byl z naměřených hodnot vypočítán průměr se směrodatnou odchylkou. Údaje byly pro skupiny měřených vzorků zapsány do tabulek. V normě pro tepelné dělení materiálu se nacházejí grafy s parametry drsnosti Rz5, úchyly kolmosti nebo úhlu. Pro odchylky jmenovitých rozměrů je tabulka dle toleranční třídy.



Obr. č. 24: Ukázka měření úchyly kolmosti

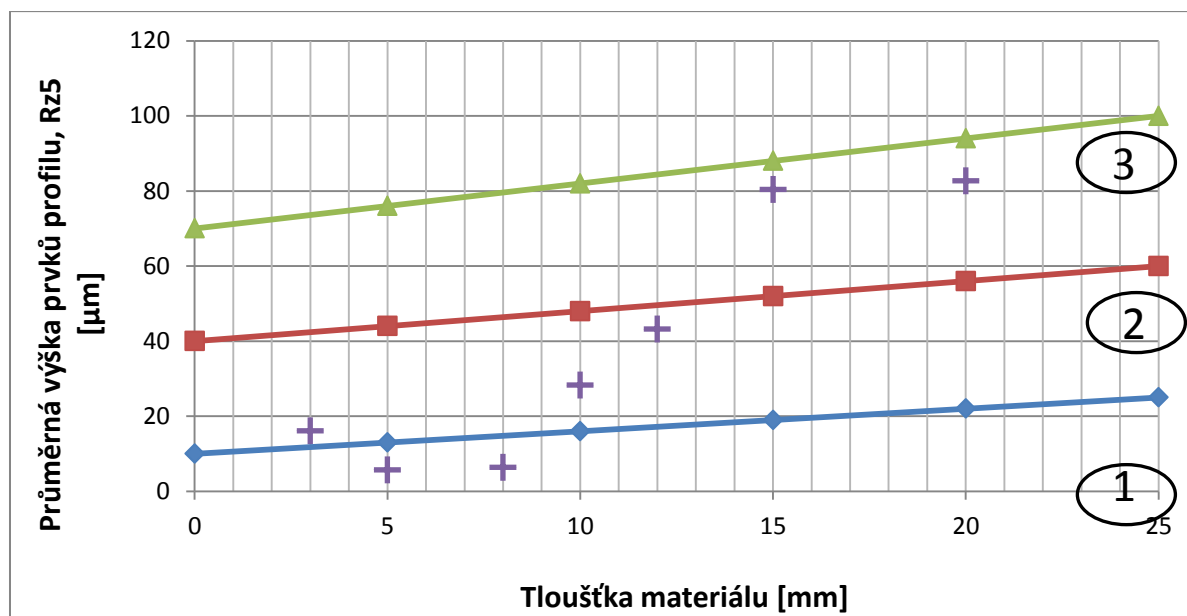


Obr. č. 25: Ukázka měření parametrů drsnosti

4.1 Zhodnocení vzorků konstrukční oceli jakosti S235JRC

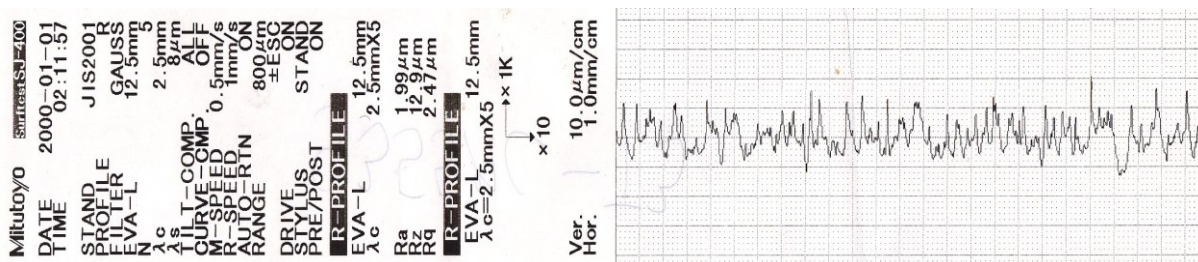
Jako první k vyhodnocení byla vybrána konstrukční ocel jakosti. Hodnoty drsnosti Rz5 a úchyly kolmosti jsou vneseny do viz níže. Do grafu jsou vyneseny i třídy přesnosti definované normou.

4.1.1 Vyhodnocení parametru Rz5



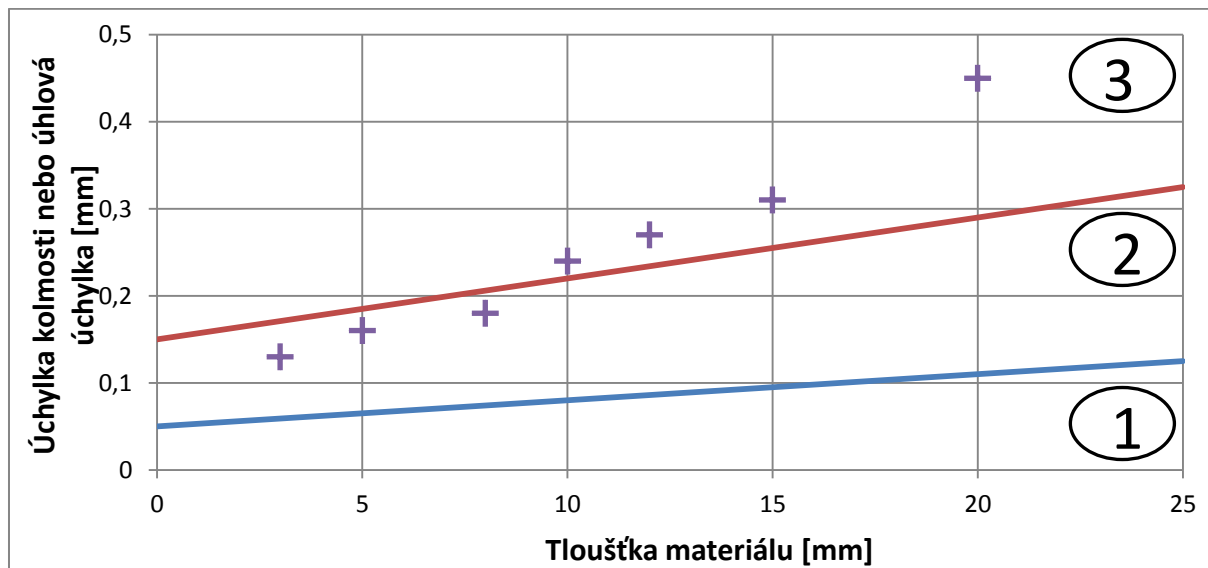
Obr. č. 26: Zařazení vzorků konstrukční oceli S235JRC do tříd přesnosti dle parametru Rz5

Z grafu vyplývá, že vzorek o tloušťce 5 a 8 mm můžeme zařadit do třídy přesnosti 1. Vzorek o tloušťce 3, 10 a 12 mm řadíme třídy přesnosti 2. Nejhůře dopadly vzorky o tloušťce 15 a 20 mm, kde řadíme do toleranční třídy přesnosti 3. U tohoto vyhodnocení můžeme být zarážející to, že vzorek tloušťky 3 mm dopadl hůř než vzorky o tloušťkách 5 a 8 mm, to můžeme zdůvodnit tím, že vzorky nebyly páleny pouze jednou obsluhou, ale byly páleny průběžně a záleží na zkušenostech jednotlivého pracovníka, jak dokážeme nastavit parametry laseru.



Obr. č. 27: Vyhodnocovací lístek parametrů drsnosti vzorku S235JRC

4.1.2 Vyhodnocení úchylky kolmosti



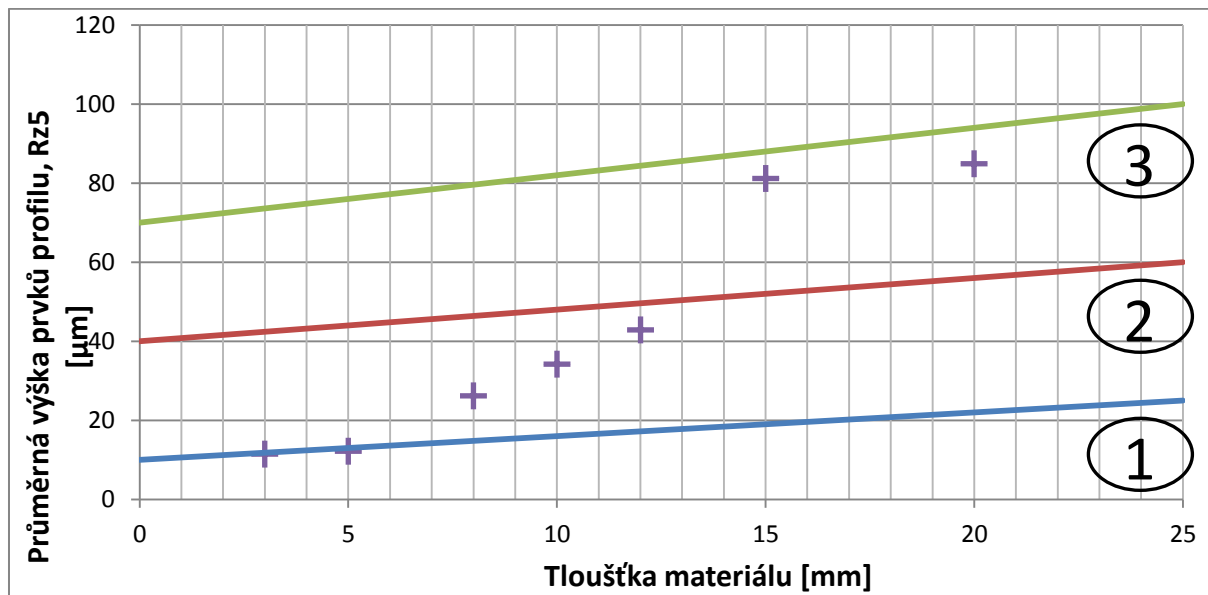
Obr. č. 28: Zařazení vzorků konstrukční oceli S235JRC do tříd přesnosti dle úchylky kolmosti

Z grafu vyplývá, že vzorky o tloušťce 3, 5 a 8 mm řadíme do druhé třídy přesnosti. Vzorky tloušťky 10, 12, 15 a 20 mm dopadly hůře a řadíme je až do třetí třídy přesnosti. Zde opět můžeme konstatovat, že s přibývajícím tloušťkou se kolmost hran zhoršuje. Závislost je podobná lineární závislosti.

4.2 Zhodnocení vzorků konstrukční oceli jakosti S355 MC

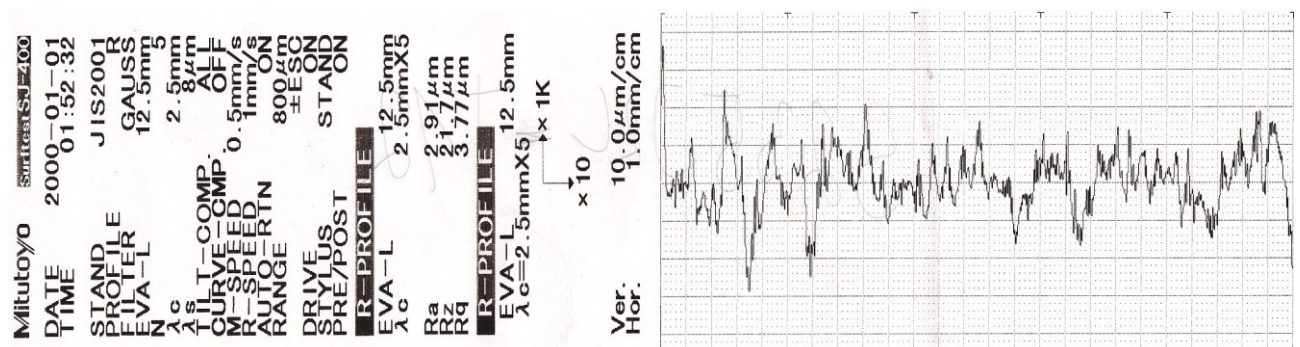
Další skupina k vyhodnocení je konstrukční ocel jakosti S355 MC. Hodnoty drsnosti R_z a úchylky kolmosti jsou vneseny do grafu viz níže. Do grafu jsou vyneseny i třídy přesnosti definované normou.

4.2.1 Vyhodnocení parametru Rz5



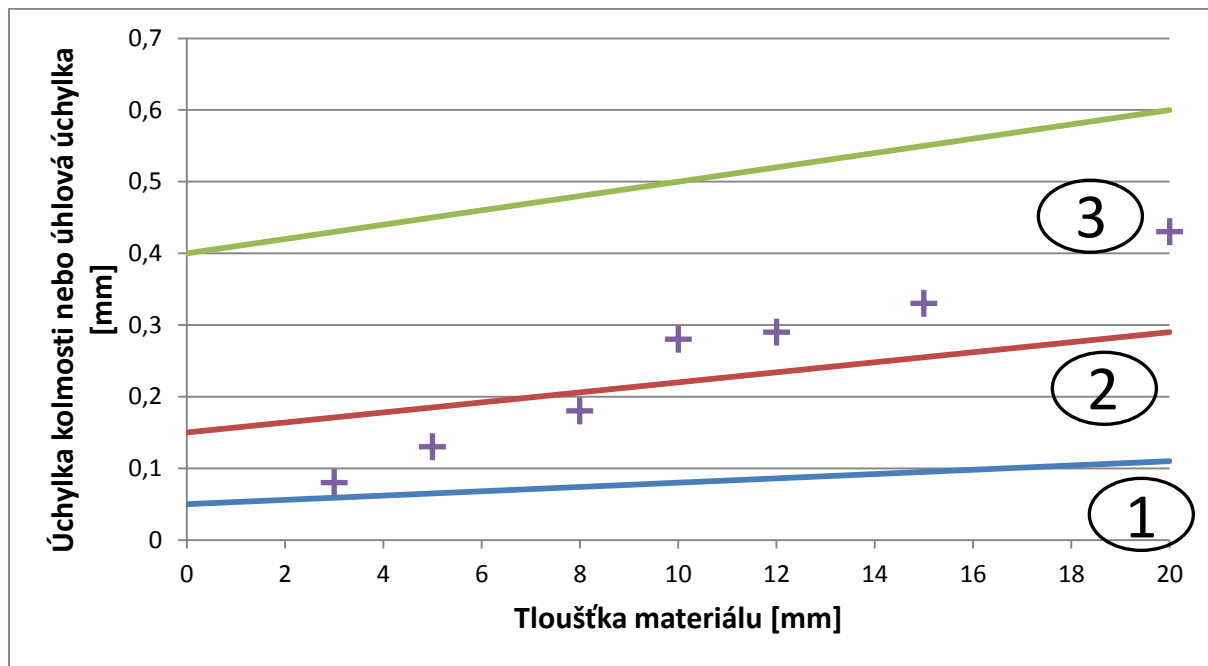
Obr.č.29: Zařazení vzorků konstrukční oceli S355MC do tříd přesnosti dle parametru Rz5

Vyhodnocené vzorky můžeme zařadit dle grafu do prvních tří tříd přesnosti. Jde vidět, že kvalita řezná hrany je závislá na tloušťce materiálu, kde s přibývajícím tloušťkou se drsnost zhoršuje. Vzorky tloušťky 3 a 5 mm řadíme do první třídy pevnosti, vzorky tlouštěk 8, 10 a 12 řadíme dle grafu do druhé třídy přesnosti a nejhůře dopadly vzorky tlouštěk 15 a 20 mm, které řadíme do třetí třídy přesnosti.



Obr. č. 30: Vyhodnocovací lístek parametrů drsnosti, vzorku S355MC

4.2.2 Vyhodnocení úchylky kolmosti



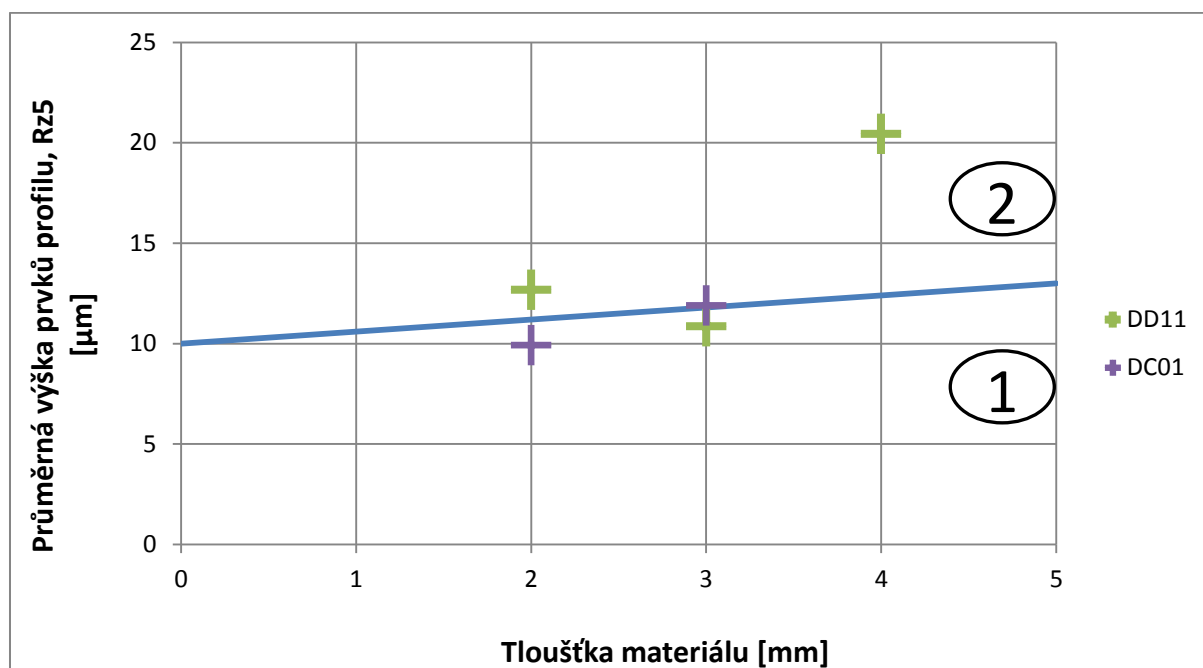
Obr.č.31: Zařazení vzorků konstrukční oceli S355MC do tříd přesnosti dle úchylky kolmosti

Z grafu zjistíme vzorky konstrukční oceli jakosti S355 MC dopadly téměř shodně se vzorky S235 JRC a řadíme je taktéž do třídy přesnosti dvě a tři. Vzorky tloušťky 3, 5 a 8 mm řadíme do druhé třídy přesnosti. Vzorky 10, 12, 15 20 řadíme do třetí třídy

4.3 Zhodnocení vzorků jakosti DC01 a DD11

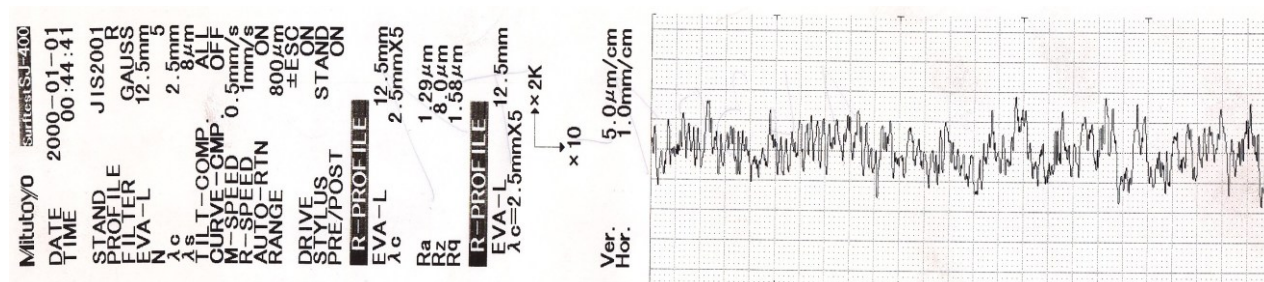
Další zástupce k vyhodnocení je hlubokotažná ocel válcovaná za studena DC01 a vzorky vyráběné za tepla DD11. Hodnoty drsnosti Rz a úchylky kolmosti jsou vneseny do grafu viz níže. Do grafu jsou vyneseny i třídy přesnosti definované normou.

4.3.1 Vyhodnocení parametru Rz5



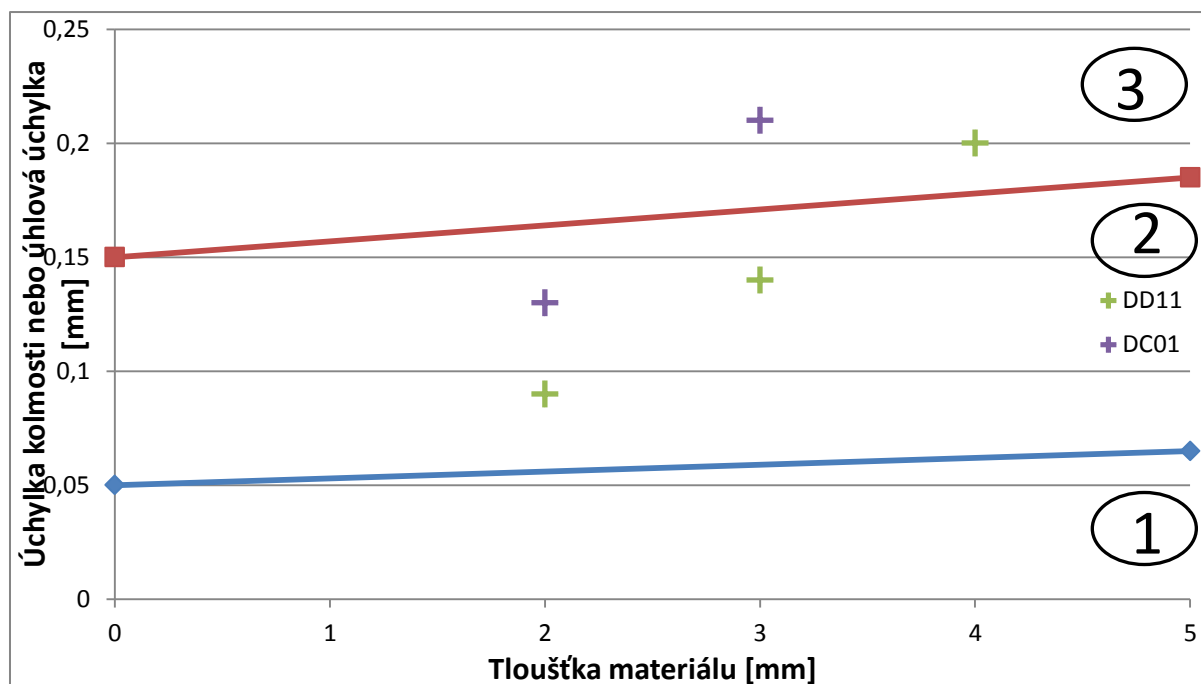
Obr.č.32: Zařazení vzorků DC01 a DD11 do tříd přesnosti dle parametru Rz5

Z grafu vyčteme, že vzorky jakosti DC01 se zařazují do prvních dvou tříd přesnosti a to konkrétně vzorek tloušťky 2 mm do první třídy přesnosti, vzorek tloušťky 3 mm spadá do druhé třídy přesnosti. U vzorky DD11 je zajímavé, že vzorek tloušťky 2 mm řadíme do druhé třídy přesnosti, oproti vzorku tloušťky 3 mm, který řadíme do první třídy přesnosti, můžeme to vysvětlit tím, že vzorky páliily, různí pracovníci s rozdílnými zkušenostmi. Vzorek tloušťky 4 mm řadíme do druhé třídy přesnosti.



Obr. č. 33: Vyhodnocovací lístek parametrů drsnosti, vzorku DC01

4.3.2 Vyhodnocení úchylky kolmosti



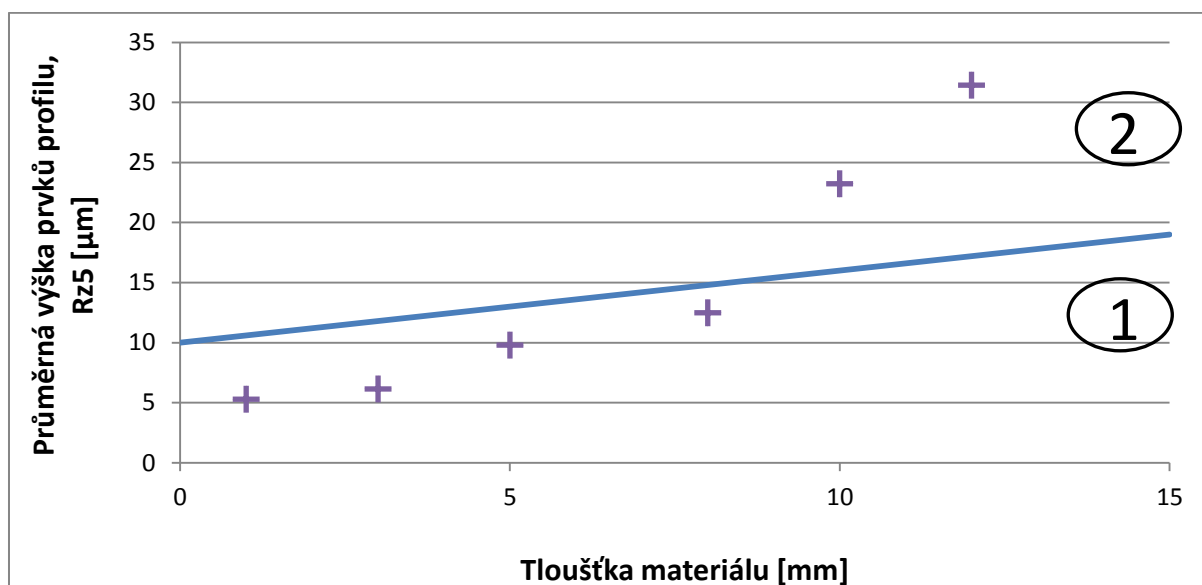
Obr. č. 34: Zařazení vzorků DC01 a DD11 do tříd přesnosti dle úchylky kolmosti

Z grafu můžeme vypočítat, že vzorky můžeme zařadit do tříd přesnosti dvě a tři, dle úchylky kolmosti. Vzorky jakosti DC01 tloušťky 2 mm řadíme do druhé třídy přesnosti, tloušťku 3 mm však hodnotíme jako méně přesné a řadíme do třetí třídy přesnosti. Vzorky DD11 o tloušťce 2 a 3 mm řadíme do druhé třídy přesnosti, vzorek tloušťky 4 mm řadíme do třetí třídy přesnosti.

4.4 Zhodnocení vzorků z korozivzdorné oceli 1.4301

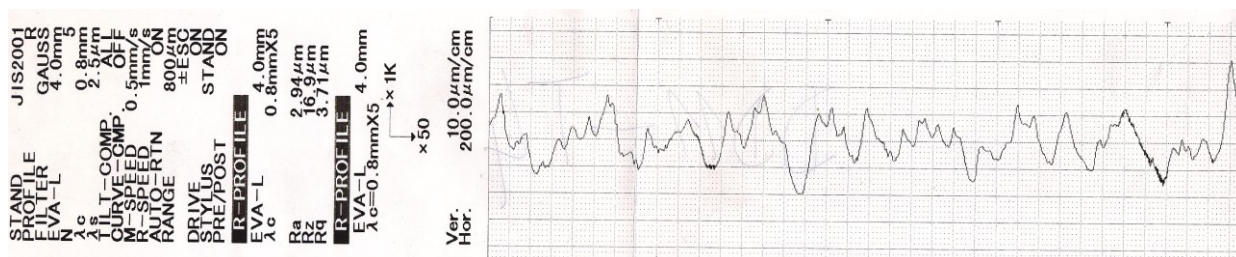
Poslední zástupce je korozivzdorná ocel 1.4301. Hodnoty drsnosti Rz a úchylky kolmosti jsou vneseny do grafu viz. níže. Do grafu jsou vyneseny i třídy přesnosti definované normou.

4.4.1 Vyhodnocení parametru Rz5



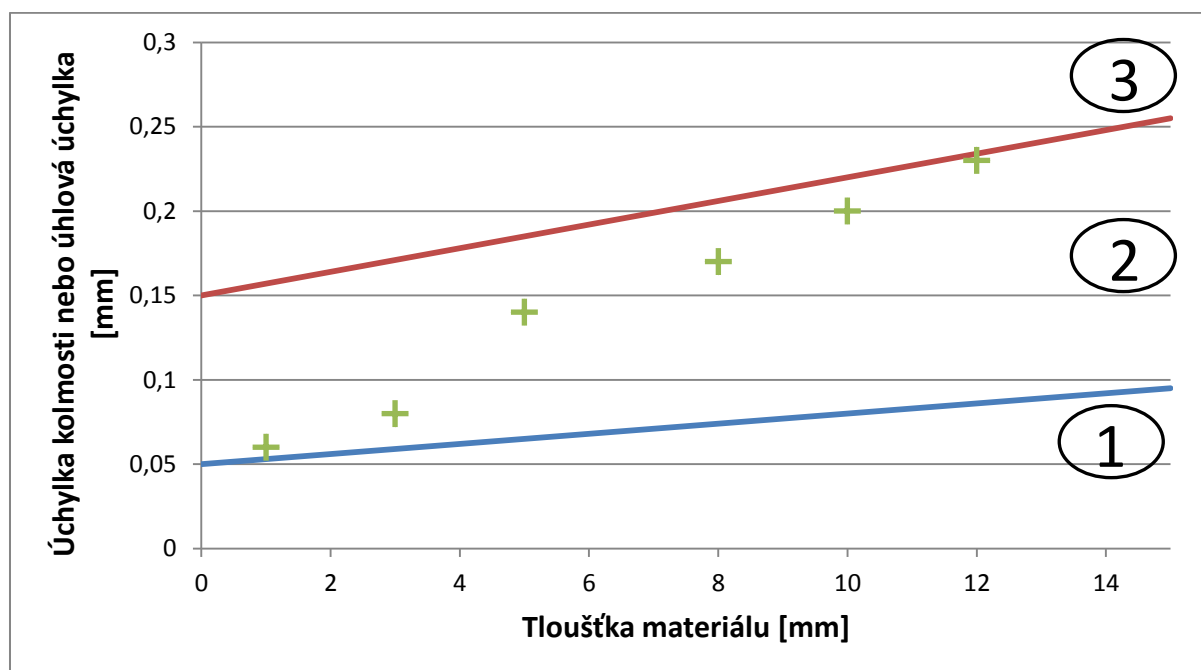
Obr. č. 35: Zařazení vzorků korozivzdorné oceli 1.4301 do tříd přesnosti dle parametru Rz5

Vzorky z korozivzdorné oceli dopadly velmi dobře a podle grafu je můžeme zařadit do prvních dvou tříd přesnosti. Opět můžeme říci, že kvalita řezné hrany se s zvyšující tloušťkou zhoršuje, kde závislost je podobná lineární závislosti. Můžeme tedy říci, že parametry i technologie dělení byla zvolena správně. Vzorky tloušťky 2, 3, 5 a 8 mm můžeme zařadit do třídy přesnosti 1, vzorky tloušťky 10 a 12 řadíme do druhé třídy přesnosti.



Obr. č. 36: Vyhodnocovací lístek parametrů drsnosti, vzorku X5CrNi18-10

4.4.2 Vyhodnocení úchyly kolmosti



Obr. č. 37: Zařazení vzorků korozivzdorné oceli 1.4301 do tříd přesnosti dle úchyly kolmosti

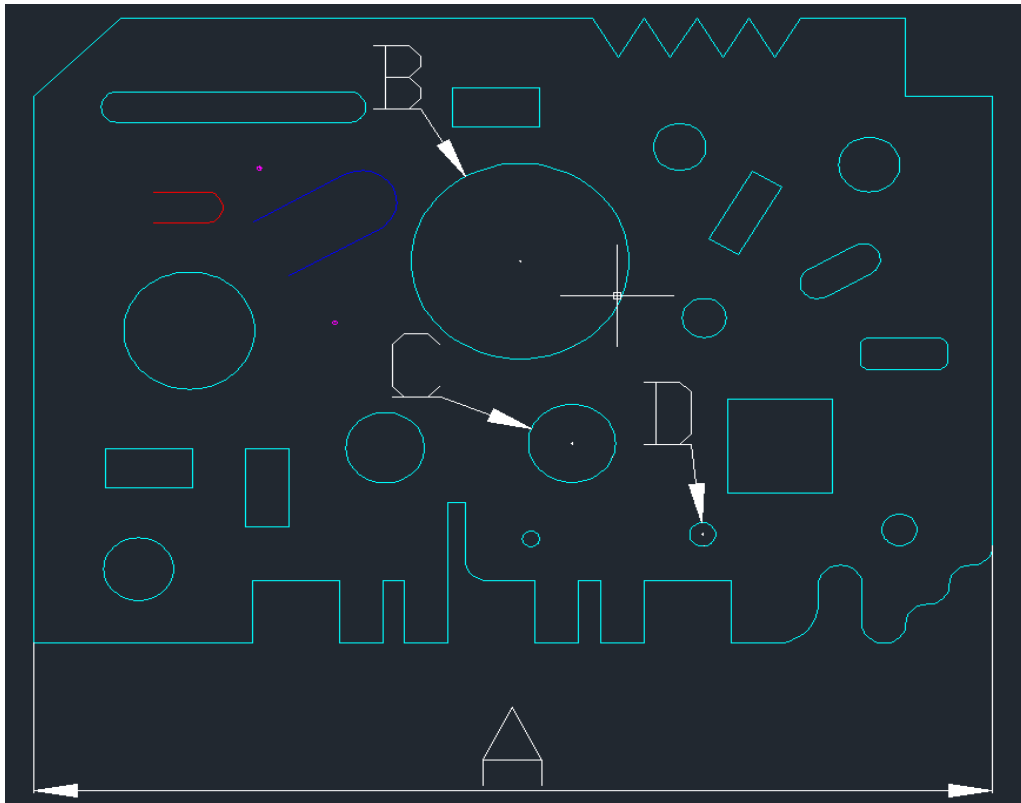
Z grafu vyčteme, že všechny vzorky z korozivzdorné oceli můžeme zařadit do druhé třídy přesnosti

4.5 Zhodnocení rozměrových úchylek

Při tomto měření byly vybrány vzorky o náhodné jakosti o tloušťkách 3, 5, 10 a 20 mm a byly změřeny a vyhodnoceny zvolené rozměry dle obrázku č. 33. Každý rozměr byl změřen 5x a vypočítána výběrová směrodatná odchylka následně se vzorky zařadily do určité toleranční třídy, dle normy ČSN EN ISO 9013 (viz. Tabulka níže)

Tabulka č. 15: Naměřené hodnoty drsnosti pro nerez ocel 1.4301 [4]

Tloušťka řezaného materiálu [mm]	Jmenovité rozměry [mm]			
	>0 <3	≥3<10	≥10<35	≥35<125
>0 ≤ 1	±0,04	±0,1	±0,1	±0,2
>1 ≤ 3,15	±0,1	±0,2	±0,2	±0,3
>3,15 ≤ 6,3	±0,3	±0,3	±0,4	±0,4
>6,3 ≤ 10	-	±0,5	±0,6	±0,6
>10 ≤ 50	-	±0,6	±0,7	±0,7



Obr. č. 38: Výkres vzorku [5]

Jmenovité rozměry:

A = 110 mm

B = 25 mm

C = 10 mm

D = 3 mm

4.5.1 Vzorek DC01 - tloušťka 2 mm

Tabulka č. 16: Naměřené hodnoty jednotlivé rozměry s výběrovou směrodatnou odchylkou

Rozměr	Naměřené hodnoty[mm]					Průměrná hodnota[mm]	Výběrová směrodatná odchylka[mm]
	1.	2.	3.	4.	5.		
A	109,94	109,92	109,93	109,98	109,95	109,944	0,023
B	25,07	25,04	25,03	25,04	25,05	25,046	0,009
C	10,01	9,97	9,99	10,03	9,98	9,996	0,023
D	2,97	2,94	3,01	3,04	2,98	2,988	0,037

Ukázka výpočtu průměrné hodnoty a výběrové směrodatné odchylky pro rozměr A.

Stanovení průměrné hodnoty:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{5} (109,94 + 109,92 + 109,93 + 109,98 + 109,95) = 109,944 \text{ mm}$$

Stanovení výběrové směrodatné odchylky:

$$s_{(x)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,023 \text{ mm}$$

 x_i ...jednotlivé naměřené hodnoty

n...počet měření

4.5.2 Vzorek X5CrNi18-10 – tloušťka 5 mm

Tabulka č. 17: Naměřené hodnoty jednotlivé rozměry s výběrovou směrodatnou odchylkou

Rozměr	Naměřené hodnoty[mm]						Průměrná hodnota[mm]	Výběrová směrodatná odchylka[mm]
	1.	2.	3.	4.	5.			
A	109,96	109,98	109,96	110,01	109,95	109,972	0,023	
B	24,94	24,93	24,92	24,95	24,96	24,940	0,016	
C	10,01	9,98	9,97	9,96	9,99	9,982	0,013	
D	3,02	2,98	2,96	3,01	2,97	2,988	0,020	

4.5.3 Vzorek X5CrNi18-10 – tloušťka 10 mm

Rozměry D a C nelze z technologických důvodů provést laserovou technologií.

Tabulka č. 18: Naměřené hodnoty jednotlivé rozměry s výběrovou směrodatnou odchylkou

Rozměr	Naměřené hodnoty[mm]						Průměrná hodnota[mm]	Výběrová směrodatná odchylka[mm]
	1.	2.	3.	4.	5.			
A	109,94	109,99	109,97	110,01	110,02	109,986	0,022	
B	25,02	24,95	24,93	24,92	24,93	24,950	0,020	
C	10,01	9,98	9,97	9,96	9,99	9,982	0,013	

4.5.4 Vzorek S235JRC – tloušťka 20 mm

Rozměry D a C nelze z technologických důvodů provést laserovou technologií.

Tabulka č. 19: Naměřené hodnoty jednotlivé rozměry s výběrovou směrodatnou odchylkou

Rozměr	Naměřené hodnoty[mm]						Průměrná hodnota[mm]	Výběrová směrodatná odchylka[mm]
	1.	2.	3.	4.	5.			
A	109,91	109,93	109,89	109,92	109,90	109,986	0,016	
B	24,89	24,91	24,88	24,90	24,91	24,898	0,012	

Z naměřených a vypočtených hodnot je patrné, že všechny vzorky můžeme zařadit do toleranční třídy číslo 1. Označení na výkrese potom může vypadat následovně:

ISO 9013-341 – Požadovaná jakost řezu je dána značkou 34 (toleranční pole 3 pro u , toleranční pole 4 pro Rz5) a mezní úchytky pro jmenovité rozměry jsou požadovány v toleranční třídě 1.

5 Závěr

První část této práce je zaměřena na obecných proces dělení různými technologiemi, od třískových a tvářecích metod přes tepelné dělení materiálu a dalšími speciálními metody dělení.

Zaměřeno bylo zvláště na laserové technologie, kde byly popsány typy laserů a metody laserového dělení. V závěru teoretické části jsou uvedeny řezné parametry s následnými vadami řezu a jako poslední jsou uvedeny výhody a nevýhody laserového řezání.

V části, kde je navrhována metodika měření přesnosti laseru je ze začátku popsána firma NC line s.r.o., kde byly pořízeny vzorky z konstrukční oceli S235JR, S355MC, DC01, DD11 a korozivzdorné oceli X5CrNi18-10, celková tloušťka vzorků tvořila rozhraní od 2 do 20 mm. Jsou zde i popsány jednotlivé měřené parametry, jak úchylka kolmosti, rozměrové úchylky, tak i parametry drsnosti. Na konci této kapitoly jsou i popsány použité zařízení a měřidla, které byly při měření použity.

V následující části jsou výsledky z jednotlivých měření a zapsány do tabulek podle skupin materiálu. Ve vyhodnocovací části jsou všechny vzorky podle naměřených hodnot zařazeny do tříd přesnosti dle parametru drsnosti Rz5, úchylky kolmosti a rozměrových úchylek podle normy ČSN EN ISO 9013.

Celkové zařazení vzorků spadalo do prvních tří tříd přesnosti. Nejlépe dopadl vzorek korozivzdorné oceli, který jak z pohledu úchylky kolmosti tak parametru drsnosti Rz5 zařazujeme do prvních dvou tříd přesnosti. Rozměrové odchylky u všech vzorků dopadly na výbornou, neboť odchylka od jmenovitého rozměru byla minimální a tudíž můžeme zařadit do 1. třídy přesnosti.

Na závěr své diplomové práce bych chtěl poděkovat technologickému oddělení firmy NC line s.r.o., zejména panu Martinu Šťastnému, který mi poskytnul cenné informace ohledně tepelného dělení materiálu a také svému vedoucímu panu Ing. Marku Pavlicovi.

6 Seznam použité literatury

- [1] Laserové řezání [online]. 2009. vyd. [cit. 2013-04-26]. ISBN 16-17-83-84. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
- [2] PERNIKÁŘ, Jiří; TYKAL, Miroslav; VAČKÁŘ, Josef. Jakost a metrologie. Brno : CERM, 2001. 151s.ISBN 80-214-1997-0
- [3] TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie-část 1. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2004. 112.s. ISBN 80-248-0672-X
- [4] ČSN EN ISO 9013. Tepelné dělení – klasifikace tepelných řezů- geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu. Praha: Český normalizační institutk, 2003. 28s.
- [5] Firemní literatura NC line, s.r.o.
- [6] HUMÁR, Anton. Výrobní technologie II: Strojírenská technologie [online]. 2008 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobnTechnologie_II.pdf
- [7] KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [8] LENFELD, Petr. Technologie II: Tvaření kovů [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#018
- [9] GAJDOŠ, František, Milan DVOŘÁK a Karel NOVOTNÝ. Technologie tvaření: Plošné a objemové tvaření. Brno: WELCO, spol. s.r.o., 1996. ISBN 80-214-0771- 7.
- [10] ASV V.D. Nový vysekávací stroj [online]. 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.asv-solnice.cz/cz/aktuality/novy-vysekavaci-stroj-10>
- [11] KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [12] Industrial Maintenance Solutions for Manufacturing and Industry. Oxy-Acetylene Cutting [online]. 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.maintenanceindustrial.com/welding-7.html>
- [13] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. TransCut - plasmové řezání [online]. 2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SIDE0ACBE76-2C708690/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3918.htm

- [14] RYBA, Jakub a Pavel KOŘÁN. Lao - lasery a optika. In: Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting) [online]. 2013 [cit. 2014]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [15] RYBA, Jakub a Miroslav NOVÁK. Lao - lasery a optika. In: Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu [online]. 2013 [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [16] Svařování svazkem elektronů. In: *Svařování svazkem elektronů* [online]. 2005 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_svazkem_elektronu_2013_mrna.pdf
- [17] CHMELÍČKOVÁ, Hana. Plynové lasery pro průmyslové využití. In: *Plynové lasery pro průmyslové využití* [online]. 2011. vyd. Olomouc: SLO UP a FZÚ AV ČR, 2011 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/1tp1_3prez.pdf
- [18] KUSALA, Jaroslav. Laser a jeho využití: Konstrukce laserů [online]. 2004 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/f4.htm>
- [19] BENKO, Bernard, Peter FOLDEREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. Laserové technologie. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
- [20] CENTRUM LASEROVÝCH A AUTOMATIZAČNÍCH TECHNOLOGIÍ. Rozdělení laserů [online]. 2009 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>

Seznam příloh

- Příloha č.1 Atest materiálu DC01
- Příloha č.2 Atest materiálu S355MC
- Příloha č.3 Atest materiálu S235JRC